



**César Manuel  
Gomes Rodrigues**

***Fortius: Robot para Captação de Som***





**César Manuel  
Gomes Rodrigues**

***Fortius: Robot para Captação de Som***

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a co-orientação científica dos Doutores José Manuel Neto Vieira e António Guilherme Rocha Campos, Professores Auxiliares do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro



## **O Júri**

Presidente

**Prof. Dr. Alexandre Manuel Moutela Nunes Mota**  
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Vogais

**Prof. Dr. Aníbal João de Sousa Ferreira**  
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Prof. Dr. José Manuel Neto Vieira**  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. António Guilherme Rocha Campos**  
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro



## Agradecimentos

Aos meus orientadores, Prof. José Vieira e Prof. Guilherme Campos, pela enorme disponibilidade, pelo incansável apoio e pelos conselhos preciosos que foram uma constante ao longo de todo o trabalho.

A José Fortes, Luís Belo Lopes e Vítor Génio por participarem de forma tão activa nas experiências realizadas. Foi uma enorme honra poder contar com a colaboração de tão reputados profissionais.

Ao Prof. Rocha Pereira, responsável pela câmara anecóica do DETI, pela prestabilidade demonstrada na cedência daquele espaço.

Ao Prof. Armando Rocha pela disponibilização da Plataforma XY e todo o *hardware* adjacente, material indispensável à realização dos testes efectuados.

Ao Prof. Paulo Dias por todo o *software* cedido relacionado com o VTK e pelo auxílio prestado na compreensão do mesmo.

À Prof. Susana Mota por toda a ajuda prestada na resolução de problemas relacionados com o *LabVIEW* e pelo *software* gentilmente cedido.

Ao técnico de som António Veiga, do DeCA, por todo o material que amavelmente emprestou e sem o qual algumas experiências não teriam sido possíveis.

Ao Padre Alexandre Cruz pela gentileza e amabilidade com que cedeu o espaço para a realização de experiências, bem como, a planta do mesmo para inclusão nesta dissertação.

Aos músicos que se prestaram a realizar as gravações anecóicas utilizadas nas experiências – guitarrista Ricardo Mota e flautista Paula Campos.

Ao colega Hugo Nogueira por se ter prontificado a ajudar cedendo o seu relatório de projecto – uma das referências deste trabalho.

A todos os meus amigos pelo indescritível companheirismo e contínuo apoio que facilitaram a realização deste trabalho, em especial ao Alexandre Vieira pela ajuda que prestou na dissertação, tendo tirado todas as fotografias que nela se incluem.

À equipa de basquetebol da Universidade de Aveiro, da qual me orgulho de fazer parte, pela influência positiva que sempre teve no meu estado de espírito, contribuindo para que realizasse as minhas tarefas, diariamente, com maior alegria e motivação.

À minha família pelos imensuráveis apoio e carinho.





## Palavras-chave

Acústica, Áudio, Automático, Captação, *Chirp*, Coluna, Correlação, Gravação, Medição, Microfone, Posicionamento, Resposta Impulsional, RIR, Robô, Sala, Som.

## Resumo

Este trabalho estuda os critérios utilizados para posicionar microfones quando se pretende captar som. Sabendo que este posicionamento é fortemente afectado pelo espaço em que são realizadas as gravações, partiu-se para uma análise que pretendia relacionar o comportamento modal das salas com os pontos empiricamente apontados (pelos técnicos de som) como ideais para determinada captação.

Para este estudo assume-se uma sala, relativamente ao seu comportamento acústico, como um sistema linear e invariante no tempo (LTI – *Linear, Time Invariant*). Este tipo de sistemas pode ser completamente caracterizado pela sua resposta ao impulso (IR – *Impulse Response*). Apresenta-se então uma introdução teórica sobre sistemas LTI e a forma de obter a sua IR. Neste projecto as medições de Respostas Impulsionais de Salas (RIR – *Room Impulse Response*) foram realizadas utilizando varrimentos em frequência como sinais de teste.

Desenvolveu-se um sistema robotizado para medir as RIR baseado numa plataforma de posicionamento com dois eixos que se movimentam no plano horizontal (X-Y) à qual se acoplou um microfone. A plataforma é controlada por um PC e contempla: um controlo automático remoto que lhe permite medir a RIR, numa grelha de pontos predefinida, de forma autónoma; um controlo manual remoto que lhe permita posicionar o microfone através da simulação de um *joystick*.

Fazendo uso das funcionalidades deste sistema realizaram-se várias experiências e medições que são explicadas em detalhe, perspectivando-se tarefas futuras para se poder progredir no estudo iniciado com este trabalho.



**Keywords**

Acoustic, Audio, Automatic, Capture, Correlation, Impulse Response, Measurement, Microphone, Positioning, Recording, RIR, Robot, Room, Sine Sweep, Sound, Speaker.

**Abstract**

This work investigates microphone positioning criteria in recording sessions. The ideal position depends upon the characteristics of the room where recordings take place. The long-term aim of this study is to establish the relationship between the objective acoustic characteristics of a room, particularly its modal behaviour, and the locations empirically chosen by sound technicians as ideal for recording.

It is assumed that, regarding its acoustic behaviour, a room is a linear, time invariant system (LTI). Such systems can be completely characterized by their impulse response (IR). A literature review is presented on LTI systems and methods of measuring their impulse responses (IR). Room impulse responses (RIR) were measured in this project using the swept-sine technique.

A robotic RIR measurement system was developed based on a microphone stand attached to a two-axis positioning platform operating in the horizontal plane (X-Y). This system, whose characteristics and functionalities are described in detail, is controlled by a PC and has two remote-control modes. The automatic mode allows it to perform batch RIR measurements autonomously on a pre-defined point grid. The manual mode, based on a virtual joystick, is intended for human-controlled microphone positioning experiments.

A number of tests, described in detail, were performed with this system. The results are presented and discussed, together with suggestions for future work.



# *Índice*

<b>Agradecimentos.....</b>	<b>vii</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Sistemas Lineares e Invariantes no Tempo (LTI) .....</b>	<b>3</b>
2.1 Linearidade .....	3
2.2 Invariância Temporal .....	4
2.3 Resposta Impulsional de um Sistema LTI .....	4
2.3.1 Sistemas de Tempo Contínuo .....	4
2.3.2 Sistemas de Tempo Discreto.....	6
<b>3 Medição da Resposta Impulsional de uma Sala .....</b>	<b>9</b>
3.1 Método Directo .....	9
3.2 Sequência de Sinusóides .....	10
3.3 Espectrometria com Atraso Temporal (TDS) .....	11
3.4 Análise FFT a Dois Canais .....	11
3.5 Método da Correlação .....	12
3.5.1 Princípio .....	12
3.5.2 Sinais de Teste .....	16
3.5.2.1 Ruído Branco Gausseano .....	16
3.5.2.2 Sequência de Comprimento Máximo .....	17

3.5.2.3	Varrimento em Frequência Linear .....	18
3.5.2.4	Varrimento em Frequência Logarítmico.....	20
<b>4</b>	<b><i>Robot de Captação de Som</i>.....</b>	<b>23</b>
4.1	Sistema de Posicionamento .....	23
4.1.1	Plataforma XY .....	23
4.1.2	<i>Hardware</i> de Controlo .....	25
4.2	Sistema Áudio.....	26
4.2.1	Microfones .....	27
4.2.1.1	Escolha do Microfone .....	28
4.2.1.2	Posicionamento do Microfone .....	33
4.2.1.3	Soluções Existentes no Mercado .....	34
4.3	Controlo do Sistema.....	36
4.3.1	<i>LabVIEW</i> .....	36
4.3.2	<i>Software</i> .....	38
4.3.2.1	Modo Matriz .....	38
4.3.2.2	Modo <i>Joystick</i> .....	43
4.3.2.3	Modo Posição e Modo Velocidade .....	45
4.3.2.4	Cálculo da Posição no Modo <i>Joystick</i> .....	46
<b>5</b>	<b><i>Testes e Medições Acústicas</i> .....</b>	<b>49</b>
5.1	Matriz de Respostas Impulsionais .....	49
5.2	Trabalho de Campo.....	51
5.2.1	Escolha do Ponto Óptimo de Captação.....	52
5.2.2	Esquema de Montagem.....	52
5.2.3	Detalhes da Montagem .....	53
5.2.4	Espaço Escolhido para Testes.....	56

5.2.5	Gravações Anecóicas .....	57
5.2.6	Relato da Experiência .....	58
5.3	Nova Experiência.....	61
5.3.1	Novo Esquema de Montagem.....	62
5.3.2	Detalhes da Nova Montagem.....	63
5.3.3	Alterações de <i>Software</i> .....	64
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro .....</b>	<b>67</b>
<b>Anexo A.....</b>		<b>71</b>
<b>Anexo B.....</b>		<b>71</b>
<b>Anexo C.....</b>		<b>71</b>
<b>Anexo D.....</b>		<b>72</b>
<b>Anexo E.....</b>		<b>72</b>
<b>Anexo F .....</b>		<b>73</b>
<b>Referências.....</b>		<b>75</b>





# Lista de Figuras

Figura 2.1: Diagrama de blocos genérico de um sistema .....	3
Figura 2.2: Aproximação de $x'(t)$ ao sinal $x(t)$ .....	4
Figura 2.3: Impulso rectangular de área unitária – $\delta'(t)$ .....	5
Figura 2.4: Diagrama de blocos dum sistema LTI com entrada $\delta(t)$ .....	5
Figura 2.5: Diagrama de blocos dum sistema LTI com entrada $\delta[n]$ .....	6
Figura 3.1: Método directo de medição da RIR.....	9
Figura 3.2: Método TDS de obtenção da RIR .....	11
Figura 3.3: Método de obtenção da RIR por análise FFT a dois canais .....	12
Figura 3.4: Diagrama de blocos do método da correlação de obtenção da IR.....	13
Figura 3.5: Diferença entre os coeficientes de $H(z)$ e o sinal resultante da correlação entre a entrada e saída do sistema.....	14
Figura 3.6: Diferença entre os coeficientes do filtro $H(z)$ e o sinal resultante da correlação entre a entrada e saída do sistema após duplicação do comprimento do sinal de entrada...	15
Figura 3.7: Diagrama de blocos do método da correlação de obtenção da RIR.....	15
Figura 3.8: Sinal aleatório – ruído branco .....	16
Figura 3.9: Autocorrelação e espectro de frequência do ruído branco .....	17
Figura 3.10: Sinal pseudo aleatório – MLS .....	17
Figura 3.11: Autocorrelação e espectro de frequência do sinal MLS.....	18
Figura 3.12: Autocorrelação e espectro de frequência do <i>chirp</i> linear .....	18
Figura 3.13: Eliminação da distorção harmónica em medições realizadas com <i>chirp</i> linear .....	19
Figura 3.14: Autocorrelação e espectro de frequência do <i>chirp</i> logarítmico.....	21
Figura 4.1: Fotografia da Plataforma XY .....	23

Figura 4.2: Esquema da Plataforma XY com as suas dimensões .....	24
Figura 4.3: Suporte que permite o acoplamento de microfones à plataforma .....	25
Figura 4.4: Terminação do suporte de microfones em rosca universal .....	25
Figura 4.5: Esquema de controlo da Plataforma XY .....	26
Figura 4.6: Diagrama de blocos do sistema áudio .....	26
Figura 4.7: Esquema interno de um microfone dinâmico .....	27
Figura 4.8: Esquema interno dum microfone de condensador .....	28
Figura 4.9: Diagrama polar dum microfone omnidireccional .....	29
Figura 4.10: Diagrama polar dum microfone bidireccional.....	29
Figura 4.11: Diagrama polar dum microfone unidireccional cardióide.....	30
Figura 4.12: Diagrama polar dum microfone unidireccional supercardióide .....	30
Figura 4.13: Circuito equivalente de um microfone ligado a um cabo.....	31
Figura 4.14: Gráfico da resposta em frequência do microfone Shure SM58 .....	32
Figura 4.15: Disposição tetraédrica das 4 cápsulas do sistema <i>MKV SoundField</i> .....	34
Figura 4.16: Esquematização espacial dos sinais X, Y e Z do <i>B-Format</i> .....	35
Figura 4.17: Esquematização espacial dos sinais X, Y, Z, W do <i>B-Format</i> .....	35
Figura 4.18: Exemplo do Painel Frontal dum programa <i>LabVIEW</i> .....	37
Figura 4.19: Exemplo do Diagrama de Blocos dum programa <i>LabVIEW</i> .....	37
Figura 4.20: Varrimento duma matriz genérica.....	38
Figura 4.21: Programa de controlo do <i>Robot</i> de Captação de Som – interface com o utilizador .....	40
Figura 4.22: Representação gráfica da variação da velocidade aplicada aos motores ao longo do tempo, no Modo Matriz, durante 3 segundos .....	41
Figura 4.23: Alteração do botão ‘ <i>Sound – PLAY</i> ’ / ‘ <i>Sound – PAUSE</i> ’ do separador ‘ <i>Joystick Mode</i> ’ da interface com o utilizador.....	44

Figura 4.24: Variação trapezoidal da velocidade ao longo do tempo que ocorre quando é realizado o controlo dos motores no Modo <i>Joystick</i> .....	48
Figura 5.1: Média das RIR obtidas no varrimento duma matriz 10x10 feito na sala 345 do DETIUA.....	50
Figura 5.2: Esquema de montagem da experiência .....	52
Figura 5.3: Esquema de ligação da placa de som Edirol UA-5 .....	55
Figura 5.4: Saída da mesa de mistura utilizada para ligar os auscultadores .....	56
Figura 5.5: Planta de parte do R/C do edifício CUFC .....	57
Figura 5.6: Fotografias do interior da câmara anecóica do DETIUA.....	57
Figura 5.7: Parte da montagem presente no auditório do CUFC (sala de gravações) .....	58
Figura 5.8: Prof. José Vieira (docente do DETIUA responsável por este projecto) com Vítor Génio a testar o controlo do <i>Robot</i> de Captação de Som na sala de audição .....	59
Figura 5.9: Webcam de monitorização da plataforma a ser ajustada por Vítor Génio. ....	60
Figura 5.10: José Fortes posicionando o microfone na sala de audição, encontrando-se também presentes o Prof. José Vieira e Luís Belo Lopes.....	60
Figura 5.11: Esquema de montagem da experiência .....	62
Figura 5.12: Esquema das ligações realizadas à placa Edirol FA-66 .....	63
Figura 5.13: Esquema da placa de som Edirol FA-66 .....	64



# 1 Introdução

Este projecto enquadra-se na área do áudio e sistemas acústicos. Mais concretamente, incide na investigação dos critérios utilizados no posicionamento de microfones.

Foi motivado pela palestra “Os meus ses”, proferida por José Fortes em 2006 no 8º Encontro da APEA (secção portuguesa da AES – *Audio Engineering Society*). José Fortes é um dos mais reputados técnicos de captação de som do nosso país. Em sua honra, deu-se a este projecto o nome *Fortius*.

O posicionamento do microfone é uma tarefa determinante para a qualidade duma captação de som. Os técnicos de som executam-na segundo critérios empíricos e de grande subjectividade. A principal hipótese subjacente a este trabalho é a de que é possível traduzir algoritmicamente esses critérios e construir um sistema capaz de encontrar o ponto óptimo de captação de forma automática – uma espécie de técnico de som robótico.

Para tal torna-se necessário, antes de mais, ter um sistema de controlo de posição do microfone que permita não só registar a resposta impulsional duma sala (RIR – *Room Impulse Response*) num grande número de pontos (controlo automático remoto) mas também posicionar o microfone por controlo manual remoto – *Robot* de Captação de Som. A ideia é reunir, por um lado, as RIR obtidas através de ciclos de posicionamento automático do microfone e, por outro lado, os pontos óptimos de captação escolhidos pelos técnicos de som. Espera-se adquirir dados que permitam relacionar os critérios subjectivos de escolha de pontos óptimos com a análise objectiva das características das RIR.

Esta análise incluirá processamento digital de sinal e visualização 3D das RIR adquiridas com o intuito de encontrar alguma característica particular que as relacione com os pontos óptimos escolhidos.

Encontradas as características que fazem de determinado ponto o ideal para a captação, deve implementar-se um algoritmo que faça com que o *Robot* de Captação de Som encontre esse ponto e para ele desloque o microfone de forma autónoma.

Note-se que é desejável que, para além do controlo remoto do microfone, seja também possível controlar toda a parte áudio do sistema. Mais concretamente, pretendem controlar-se os processos de injeção de sinal áudio na sala e captação através do microfone.

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, sendo este o primeiro deles. No capítulo 2 abordam-se os sistemas lineares e invariantes no tempo (LTI – *Linear, Time Invariant*) uma vez que, como se verá, as salas podem ser tratadas como sistemas desse tipo.

No capítulo 3 analisam-se os vários métodos que podem ser utilizados para a medição da RIR e averigua-se, de entre os sinais de teste mais utilizados neste tipo de medições, qual traz mais vantagens.

O capítulo 4 é dedicado ao *Robot* de Captação de Som que é analisado de forma detalhada. É feita uma descrição de todo o sistema mecânico de posicionamento e da forma como este é controlado. Uma vez que o sistema envolve também uma parte áudio, dedicada à reprodução e captação de som, analisam-se os seus elementos constituintes e os métodos utilizados no seu controlo.

O capítulo 5 trata da parte experimental deste trabalho, descrevendo as montagens utilizadas para a realização de testes e experiências e analisando os resultados obtidos. É apresentada ainda uma perspectiva das experiências a realizar futuramente.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e é feita uma abordagem ao trabalho futuro. São dadas directrizes para a melhoria do sistema de posicionamento e referem-se alguns testes, experiências e análises de dados que poderão ajudar no desenvolvimento do estudo de que é alvo este projecto.

## 2 Sistemas Lineares e Invariantes no Tempo (LTI)

Em Engenharia, dá-se o nome de sistema a algo que executa uma operação ou transformação sobre um sinal de entrada produzindo um sinal de saída [1]. Seja, então,  $y(t)$  a resposta de um sistema  $H$  a um sinal de entrada  $x(t)$ , como se esquematiza na Figura 2.1.

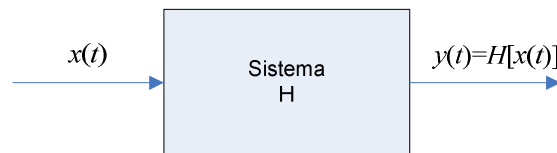


Figura 2.1: Diagrama de blocos genérico de um sistema

### 2.1 Linearidade

O sistema diz-se linear se possuir duas propriedades essenciais: Homogeneidade e Aditividade [2].

Homogeneidade: um sistema diz-se homogêneo quando a amplitude do seu sinal de saída é proporcional à amplitude do seu sinal de entrada, ou seja, se responder à entrada  $kx(t)$  com a saída  $ky(t)$ , em que  $k$  é um escalar:

$$H[kx(t)] = kH[x(t)]. \quad \text{Equação 2.1}$$

Aditividade: um sistema diz-se aditivo se responder à soma de dois sinais com a soma das respostas a cada um desses sinais. Assim, se o sistema responde à entrada  $x_1(t)$  com a saída  $y_1(t)$  e à entrada  $x_2(t)$  com a saída  $y_2(t)$ , será aditivo se responder a  $x_1(t) + x_2(t)$  com a saída  $y_1(t) + y_2(t)$ . Matematicamente:

$$H[x_1(t) + x_2(t)] = H[x_1(t)] + H[x_2(t)]. \quad \text{Equação 2.2}$$

Como um sistema só é linear se possuir as duas características anteriormente descritas, pode escrever-se que o sistema é linear se e só se:

$$H[\alpha x_1(t) + \beta x_2(t)] = \alpha H[x_1(t)] + \beta H[x_2(t)], \quad \text{Equação 2.3}$$

sendo  $\alpha$  e  $\beta$  escalares.

## 2.2 Invariância Temporal

Diz-se que um sistema é invariante no tempo se a um deslocamento temporal na sua entrada corresponder igual deslocamento na sua saída [3]. Assim, para que o sistema representado na Figura 2.1 seja invariante no tempo deverá responder à entrada  $x(t-\tau)$  com a saída  $y(t-\tau)$ .

## 2.3 Resposta Impulsional de um Sistema LTI

Os sistemas simultaneamente lineares e invariantes no tempo (LTI – *Linear, Time Invariant*) formam uma importante categoria de sistemas em resultado de poderem ser completamente caracterizados pela sua resposta ao impulso de *Dirac* – Resposta Impulsional (IR – *Impulse Response*). Isto significa que dada a IR dum sistema LTI é possível prever a saída deste sistema para qualquer sinal de entrada como se demonstra em seguida [1].

### 2.3.1 Sistemas de Tempo Contínuo

Considere-se  $x'(t)$  como a aproximação a um sinal  $x(t)$  como ilustra a Figura 2.2:

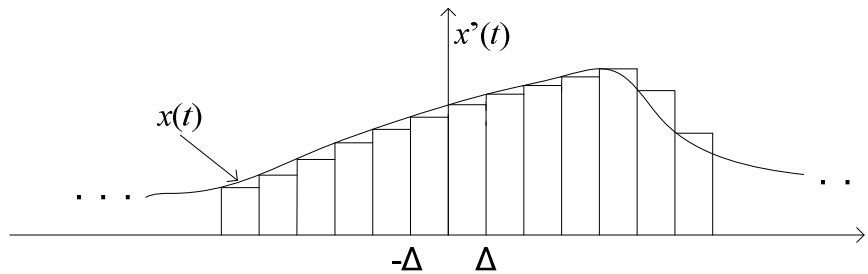


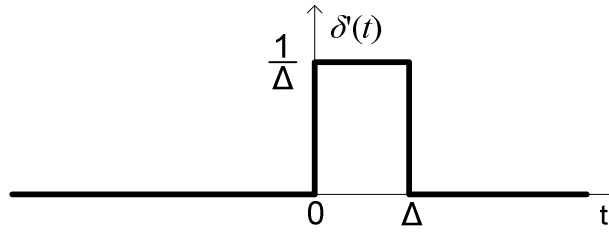
Figura 2.2: Aproximação de  $x'(t)$  ao sinal  $x(t)$  [1]

Esta aproximação pode ser traduzida matematicamente pela Equação 2.4:

$$x'(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k\Delta) \delta'(t - k\Delta) \Delta, \quad \text{Equação 2.4}$$

em que  $\delta'(t)$  é o impulso rectangular de área unitária da Figura 2.3:





**Figura 2.3: Impulso rectangular de área unitária –  $\delta'(t)$  [1]**

No limite, quando  $\Delta \rightarrow 0$ , a aproximação torna-se exacta:

$$x(t) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k\Delta) \delta'(t - k\Delta) \Delta. \quad \text{Equação 2.5}$$

Nesta situação, o somatório tenderá para um integral e o impulso rectangular  $\delta'(t)$  para o impulso de Dirac,  $\delta(t)$ . Assim, fazendo  $k\Delta \rightarrow \tau$  e  $\Delta \rightarrow \partial\tau$ , obtém-se o seguinte integral de convolução:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) \partial\tau. \quad \text{Equação 2.6}$$

Seja  $h(t)$  a resposta dum sistema LTI ao impulso unitário, como mostra a Figura 2.4:



**Figura 2.4: Diagrama de blocos dum sistema LTI com entrada  $\delta(t)$**

Sendo  $h'(t)$  a resposta do mesmo sistema à entrada  $\delta'(t)$ , como o sistema é invariante no tempo, a sua resposta à entrada  $\delta'(t - k\Delta)$  será a saída  $h'(t - k\Delta)$ . Tendo em conta a Equação 2.4 e sabendo que o sistema é linear, a resposta à entrada  $x'(t)$  será dada por:

$$y'(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k\Delta) h'(t - k\Delta) \Delta. \quad \text{Equação 2.7}$$

Como antes (Equação 2.5), pode escrever-se:

$$y(t) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k\Delta)h'(t-k\Delta)\Delta. \quad \text{Equação 2.8}$$

Quando  $k\Delta \rightarrow \tau$  e  $\Delta \rightarrow \partial\tau$ , resulta:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t-\tau)\partial\tau. \quad \text{Equação 2.9}$$

Esta equação define a convolução no domínio do tempo:

$$y(t) = x(t) * h(t). \quad \text{Equação 2.10}$$

Assim, a saída de um sistema LTI é dada pela convolução da sua entrada com a sua resposta impulsional. Está então demonstrado que é possível prever a saída de um sistema deste tipo para qualquer sinal de entrada conhecendo a sua resposta impulsional.

### 2.3.2 Sistemas de Tempo Discreto

A demonstração anterior pode ser facilmente adaptada a tempo discreto. O equivalente discreto do impulso de *Dirac*  $\delta(t)$  é  $\delta[n]$ , onde  $n$  representa o índice da amostra:

$$\delta[n] = \begin{cases} 0, n \neq 0 \\ 1, n = 0 \end{cases}. \quad \text{Equação 2.11}$$

Qualquer sinal de tempo discreto pode ser escrito em função de  $\delta[n]$ :

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k]\delta[n-k]. \quad \text{Equação 2.12}$$

Considere-se um sistema LTI com entrada  $\delta[n]$ . O seu sinal de saída é a resposta impulsional do sistema, representada por  $h[n]$ , como mostra a Figura 2.5:



**Figura 2.5: Diagrama de blocos dum sistema LTI com entrada  $\delta[n]$**

Tendo em conta que o sistema é LTI, se a sua entrada for  $x[n] = \delta[n-k]$ , a sua resposta será  $y[n] = h[n-k]$ . Conjugando este resultado com a Equação 2.12 obtém-se, em analogia com o integral de convolução apresentado na Equação 2.9, a seguinte soma de convolução:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k]h[n-k]. \quad \text{Equação 2.13}$$

Esta equação define a convolução em tempo discreto:

$$y[n] = x[n] * h[n]. \quad \text{Equação 2.14}$$



### 3 Medição da Resposta Impulsional de uma Sala

Neste projecto, o sistema cuja resposta impulsional se pretende medir é uma sala que, não sendo um sistema LTI perfeito, pode ser tratada como tal [4] e por consequência, completamente caracterizada pela sua resposta ao impulso (secção 2.3). Existem vários métodos para a obtenção da resposta impulsional duma sala (RIR – *Room Impulse Response*), nomeadamente [5]:

- Método Directo (com um impulso);
- Sequência de Sinusóides (*Stepped Sine*);
- Espectrometria com Atraso Temporal (*TDS – Time Delay Spectrometry*);
- Análise FFT a Dois Canais (*Dual-Channel FFT Analysis*);
- Método da Correlação.

De seguida será feita uma breve descrição dos quatro primeiros métodos mencionados e uma análise detalhada do método utilizado neste trabalho – Método da Correlação.

#### 3.1 Método Directo

O método directo com um impulso encontra-se esquematizado na Figura 3.1.

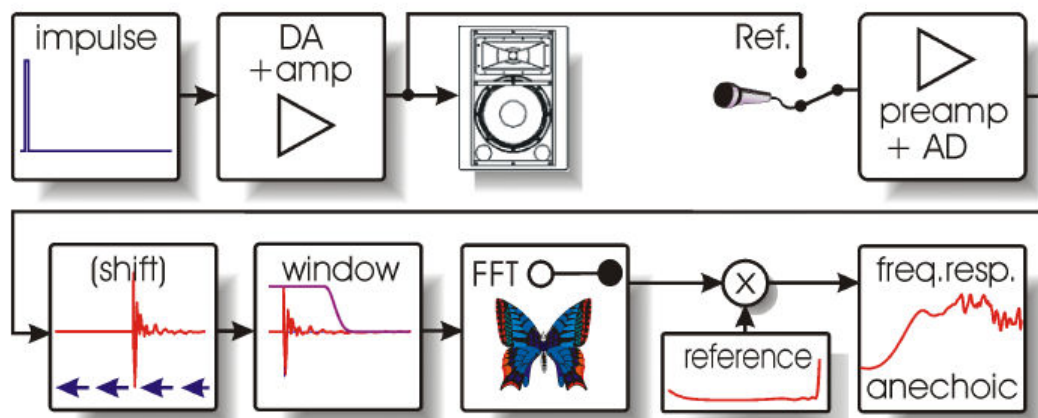


Figura 3.1: Método directo de medição da RIR [5]

Este método consiste na inserção de um impulso à entrada do sistema e medição da sua saída que, neste caso, corresponde à sua resposta impulsional. É um método que, embora

pareça simples, não é facilmente implementado porque gerar um impulso ideal (sinal instantâneo e de energia infinita) é uma tarefa irrealizável. As medidas são, então, realizadas colocando à entrada do sistema um sinal o mais próximo possível do impulso ideal.

Como o sinal que se pretende gerar é idealmente instantâneo e por isso pouco energético, não se consegue uma relação sinal ruído (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*) suficientemente elevada. Se se tentasse compensar a fraca SNR aumentando a amplitude do sinal surgiria outro problema – sobre carregamento do sistema – o que significa que este passaria a operar numa região não linear, deixando assim de se poder classificar como LTI.

Uma das técnicas utilizadas para compensar o facto de o sinal de entrada não ser um impulso ideal consiste em calcular a RIR com base na média de várias medições. Esta técnica provoca um aumento de 3dB à SNR por cada vez que se duplica o número de medições utilizadas no cálculo da média [5].

### **3.2 Sequência de Sinusóides**

Este método, denominado na literatura inglesa por *Stepped Sine*, baseia-se na injeção passo a passo de sinusóides de frequência sucessivamente mais elevada. O degrau de aumento da frequência determina a resolução da medição.

A resposta do sistema pode ser analisada filtrando e rectificando a frequência fundamental ou através da transformada de *Fourier* (FFT – *Fast Fourier Transform*), retirando a fundamental do espectro. O método da FFT permite uma supressão total de todas as outras frequências e é, por isso, preferido relativamente à análise temporal que, por sua vez, envolve filtros passa-banda que prejudicam a precisão do método.

Após ser realizada uma medição, a frequência do sinal de excitação é aumentada multiplicando o valor anterior por uma constante que é mantida fixa, obtendo-se assim um incremento logarítmico das frequências.

A grande vantagem deste método é a elevada SNR que se pode obter apenas com uma medição. Salienta-se também a sua precisão, que leva a que seja frequentemente utilizado na calibração de equipamentos electrónicos e acústicos.

### 3.3 Espectrometria com Atraso Temporal (TDS)

O método TDS foi criado por Richard Heyser com o objectivo de medir a resposta de colunas de som. No entanto, pode também ser aplicado à medição da RIR. Este método encontra-se representado na Figura 3.2.

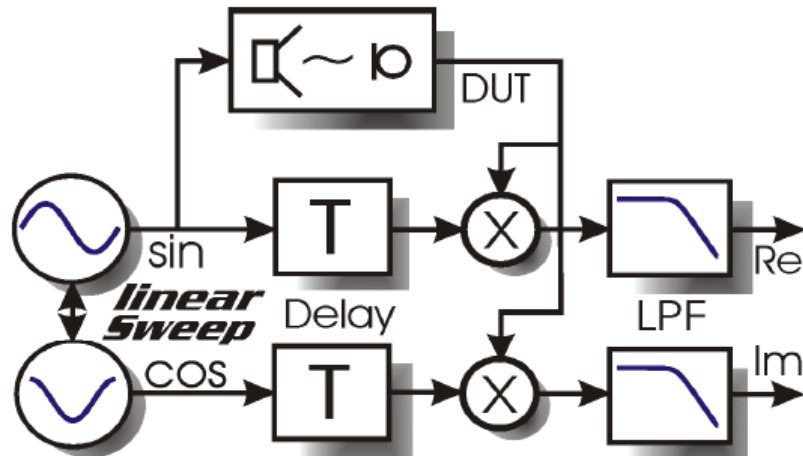


Figura 3.2: Método TDS de obtenção da RIR [5]

O TDS baseia-se num gerador que produz, simultaneamente, dois sinais: um seno de frequência variável (*chirp*) e um sinal em quadratura com o primeiro – sinal co-seno. O sinal seno é injectado numa coluna e sua resposta é captada por um microfone para, depois, ser multiplicada pelos dois sinais gerados inicialmente, após estes terem sido submetidos a um atraso temporal. Assim, a resposta é multiplicada pelo seno, obtendo-se a parte real da função de transferência, e pelo co-seno, obtendo-se a parte imaginária.

Este método, como utiliza um varrimento em frequência (*chirp*) linear cujo espectro é branco (como se verá na secção 3.5.2.3), apresenta uma grande desvantagem – ruído às baixas frequências.

### 3.4 Análise FFT a Dois Canais

O método de Análise FFT a Dois Canais (*Dual-Channel FFT Analysis*) está esquematizado na Figura 3.3. O princípio básico deste método é dividir o espectro do sinal captado pelo microfone pelo espectro do sinal que é injectado na coluna.

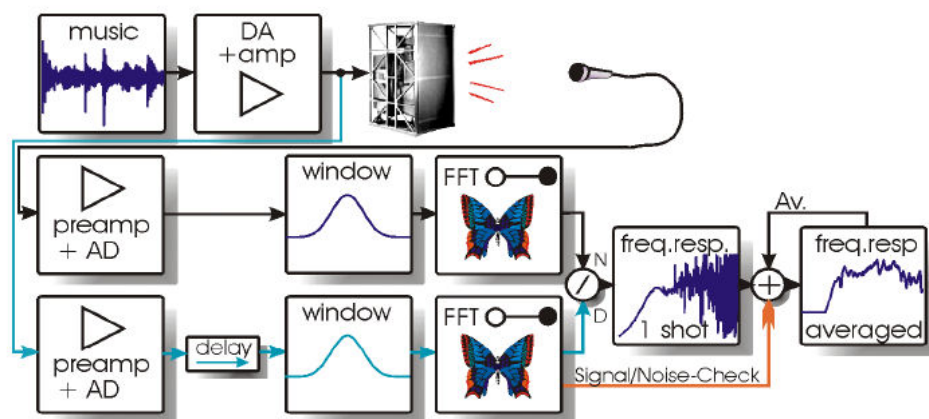


Figura 3.3: Método de obtenção da RIR por análise FFT a dois canais [5]

Como se pode observar, o sinal que é injectado na coluna (chamemos-lhe sinal A) e o sinal que é captado pelo microfone (chamemos-lhe sinal B) são processados simultaneamente. O processamento consiste, numa fase inicial, na amplificação e conversão analógico-digital (AD) dos dois sinais e no cálculo das suas FFT. Este cálculo é efectuado sobre sucessivos segmentos dos sinais, com um número de amostras definido pelo bloco *window*.

A FFT de cada segmento do sinal B é dividida pela FFT do correspondente segmento do sinal A, dando origem a vários quocientes  $B/A$ . Cada um deles constitui uma medição da resposta em frequência do sistema. A média de todos os quocientes  $B/A$  fornece o resultado final.

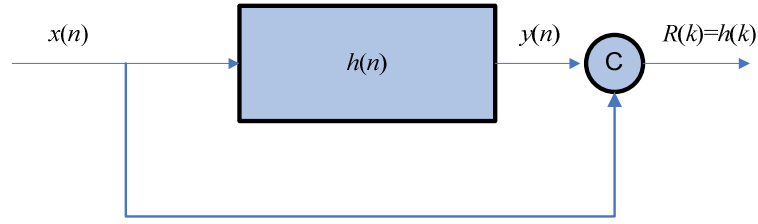
Este método apresenta a particularidade de poder utilizar variadíssimos sinais de teste (música, por exemplo).

## 3.5 Método da Correlação

### 3.5.1 Princípio

O método da correlação foi o escolhido para efectuar a medição da resposta impulsional do nosso sistema (sala). Na Figura 3.4 está esquematizado o método em causa.





**Figura 3.4: Diagrama de blocos do método da correlação de obtenção da IR**

Este método é baseado no seguinte princípio: se o sinal de entrada do sistema tiver autocorrelação bastante próxima de um impulso, então, a correlação cruzada entre o sinal de entrada e o sinal de saída corresponde à resposta impulsional do sistema em análise.

De seguida apresenta-se a demonstração matemática do princípio enunciado [6].

A correlação entre os sinais de entrada e saída é dada pela Equação 3.1:

$$R_{xy}[\tau] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]y[n + \tau]. \quad \text{Equação 3.1}$$

Sabendo que o sinal de saída ( $y$ ) corresponde à convolução do sinal de entrada ( $x$ ) com a resposta do sistema ( $h$ ) (secção 2.3), pode escrever-se:

$$\begin{aligned} R_{xy}[\tau] &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] \left( \sum_{k=0}^{N-1} h[k]x[n + \tau - k] \right) = \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \left( \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]x[n + \tau - k] \right) = \sum_{k=0}^{N-1} h[k]R_{xx}[\tau - k] \end{aligned} \quad \text{Equação 3.2}$$

Como se parte do pressuposto que a autocorrelação do sinal de entrada pode ser aproximada a um impulso, pode escrever-se:

$$R_{xx}[\tau - k] = \delta[\tau - k]. \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde  $\delta[n]$  representa o impulso unitário dado pela Equação 2.11 que implica:

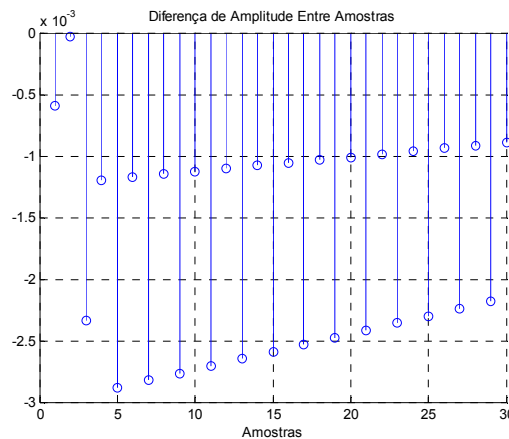
$$\delta[\tau - k] = \begin{cases} 1, & \tau = k \\ 0, & \tau \neq k \end{cases} \quad \text{Equação 3.4}$$

Assim:

$$R_{xy}[\tau] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \delta[\tau - k] = h[\tau]. \quad \text{Equação 3.5}$$

Ou seja, a correlação cruzada entre a entrada e a saída equivale à resposta impulsional do sistema, como se pretendia demonstrar.

Este método foi testado recorrendo ao *MATLAB*<sup>1</sup>, apresentando-se o código utilizado no *Anexo A*. O teste consistiu em criar um filtro de resposta a impulso finita (FIR – *Finite Impulse Response*) que seria o nosso sistema *H*. Posteriormente calculou-se a resposta desse filtro a um *chirp* linear cuja autocorrelação se aproxima do impulso de *Dirac* (como se verá na secção 3.5.2.3). Correlacionando essa resposta com o sinal de entrada deveriam obter-se os coeficientes do filtro FIR inicialmente criado. A Figura 3.5 evidencia a pequena diferença que se obteve entre os coeficientes do filtro FIR e o resultado da correlação entre a entrada e a saída do sistema.

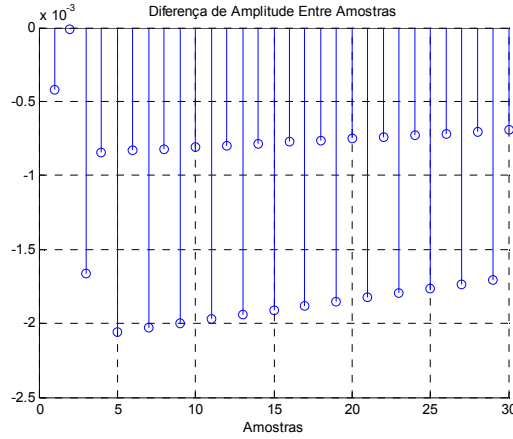


**Figura 3.5: Diferença entre os coeficientes de  $H(z)$  e o sinal resultante da correlação entre a entrada e saída do sistema**

---

<sup>1</sup> O *MATLAB* é um poderoso *software* de cálculo numérico, propriedade da empresa *TheMathWorks, Inc.* e destaca-se pela sua robustez de cálculo matricial e de processamento de sinal.

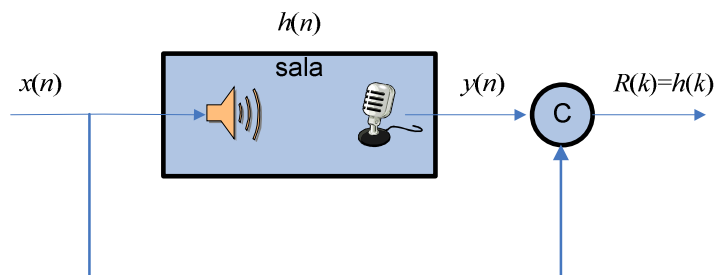
A pequena discrepância deve-se ao facto de a autocorrelação do sinal de entrada não ser exactamente igual ao impulso. Só o seria se o *chirp* fosse infinito. O erro diminui, portanto, com o aumento do comprimento do *chirp*, como comprova a Figura 3.6.



**Figura 3.6: Diferença entre os coeficientes do filtro  $H(z)$  e o sinal resultante da correlação entre a entrada e saída do sistema após duplicação do comprimento do sinal de entrada**

A figura evidencia a diminuição do erro após ter sido duplicado o comprimento do *chirp*.

Este mesmo algoritmo pode ser aplicado ao sistema sala afim de obter a sua RIR. Deve-se começar por criar um sinal cuja autocorrelação seja próxima de um impulso. Este será reproduzido numa coluna de som e captado por um microfone. Por fim será calculada a correlação cruzada entre o sinal injectado na sala e o sinal captado pelo microfone. O resultado deste cálculo corresponderá à resposta impulsional do sistema (sala) em estudo, como esquematiza a Figura 3.7.



**Figura 3.7: Diagrama de blocos do método da correlação de obtenção da RIR**

### 3.5.2 Sinais de Teste

Os sinais de teste dividem-se em dois grupos: sinais aleatórios e sinais pseudo-aleatórios. O sinal aleatório mais utilizado é o ruído branco, enquanto que, no que respeita a sinais pseudo-aleatórios, destacam-se as sequências de comprimento máximo (MLS – *Maximum Length Sequences*) e os varrimentos em frequência (*chirps*).

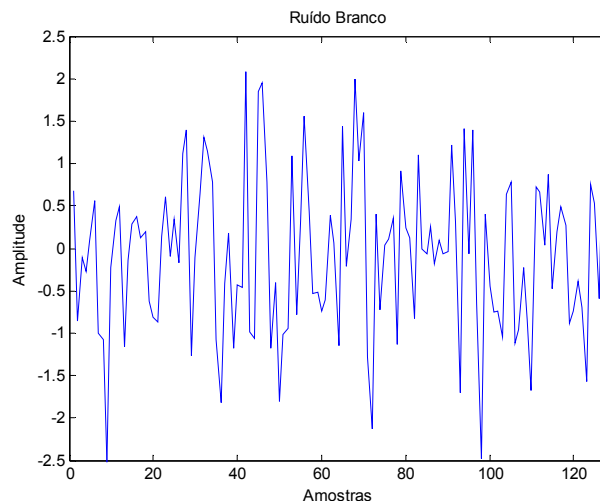
Uma vantagem de usar sinais pseudo-aleatórios como sinais de teste é o facto de estes serem determinísticos. Assim, não são necessárias gravações, uma vez que é possível criá-los, em qualquer altura, através das suas equações geradoras. Os sinais aleatórios não gozam desta propriedade.

#### 3.5.2.1 Ruído Branco Gausseano

O ruído branco gausseano é um sinal aleatório obtido através duma combinação simultânea de todas as frequências.

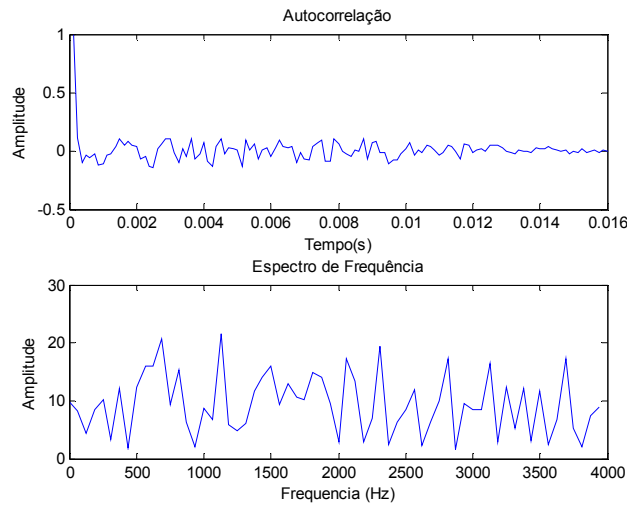
A Figura 3.8 apresenta ruído branco gerado com o *MATLAB* através do comando:

```
>> x = randn (1,128);
```



**Figura 3.8: Sinal aleatório – ruído branco**

Este sinal possui autocorrelação muito próxima do impulso (Figura 3.9) e a sua potência encontra-se uniformemente distribuída [2].

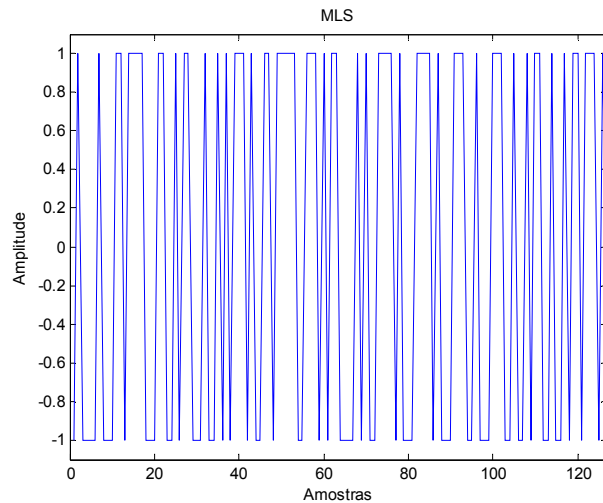


**Figura 3.9: Autocorrelação e espectro de frequência do ruído branco**

### 3.5.2.2 Sequência de Comprimento Máximo

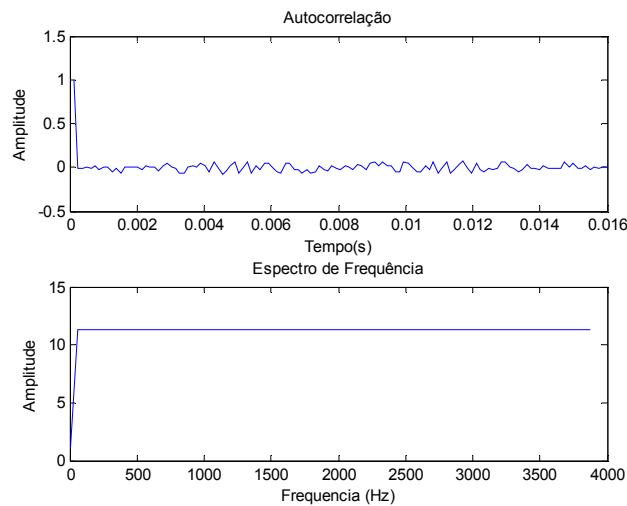
O sinal MLS é uma sequência binária sem repetição (sinal pseudo-aleatório), com comprimento  $L = 2^N - 1$  amostras, sendo  $N$  a ordem da sequência [5], [7].

Na Figura 3.10 encontra-se representado um sinal MLS gerado a partir do *MATLAB* (código presente no *Anexo A*) com comprimento  $L = 2^7 - 1 = 127$  amostras.



**Figura 3.10: Sinal pseudo aleatório – MLS**

Esta sequência de comprimento máximo possui autocorrelação próxima do impulso e um espectro de frequência linear e uniforme (espectro branco) como se pode observar na Figura 3.11.

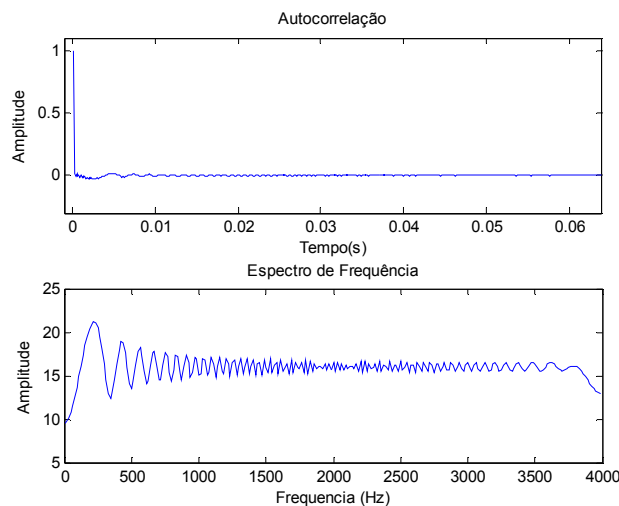


**Figura 3.11: Autocorrelação e espectro de frequência do sinal MLS**

Como se pode observar, todas as componentes de frequência têm exactamente a mesma amplitude, em consequência do sinal se repetir periodicamente.

### 3.5.2.3 Varrimento em Frequência Linear

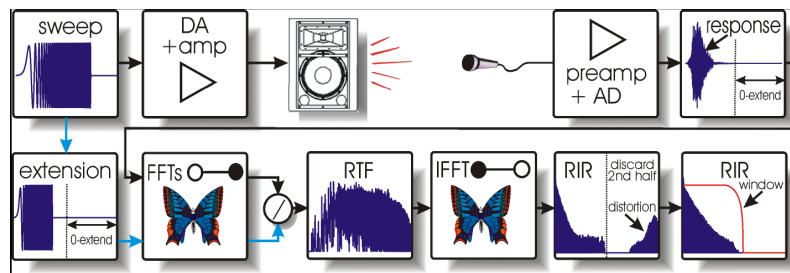
Um varrimento em frequência (*chirp*) linear, denominado na literatura inglesa por *linear sine sweep*, é um sinal sinusoidal, de amplitude constante, cuja frequência varia linearmente ao longo do tempo. O *chirp* linear tem um espectro branco e autocorrelação muito próxima do impulso, à semelhança do sinal MLS [5] (Figura 3.12).



**Figura 3.12: Autocorrelação e espectro de frequência do *chirp* linear**

Porém, ao contrário deste, só injecta no sistema um único valor de frequência em cada instante. Tal facto diminui drasticamente o risco de sobrecarregar o sistema quando se aplica um sinal de teste de maior amplitude, o que facilita a obtenção de elevadas SNR. Outra vantagem do *chirp* linear relativamente ao MLS é um aumento mais significativo da SNR quando se recorre à média de várias medições.

Contudo, a maior vantagem do *chirp* linear é o facto das componentes de frequência correspondentes à distorção harmónica poderem ser completamente isoladas da RIR adquirida [5]. A distorção pode assim ser facilmente eliminada utilizando, por exemplo, o método da Figura 3.13.



**Figura 3.13: Eliminação da distorção harmónica em medições realizadas com *chirp* linear [5]**

Resumidamente: acrescentam-se zeros ao sinal de teste e à resposta impulsional até ficarem ambos com o dobro do tamanho inicial. Posteriormente é calculada a FFT de ambos os sinais e o espectro da resposta ao *chirp* é dividido pelo espectro do próprio *chirp*. Aplicando a transformada inversa de Fourier (IFFT – *Inverse Fast Fourier Transform*) obtém-se uma RIR cuja segunda metade é apenas distorção, bastando então filtrá-la para obter a RIR pretendida, sem distorção.

No âmbito deste trabalho foram realizadas algumas medições com *chirps* lineares como sinais de teste. Deduz-se de seguida a equação que descreve este tipo de sinais [8].

Considere-se uma sinusóide:

$$x(t) = \cos(\theta(t)) = \cos(2\pi f(t)t). \quad \text{Equação 3.6}$$

Sabendo que a frequência da sinusóide deve variar de forma linear ao longo do tempo, pode escrever-se:

$$f(t) = \frac{\partial(\theta(t))}{\partial t} \cdot \frac{1}{2\pi} = \beta t + \alpha, \quad \text{Equação 3.7}$$

sendo  $\alpha$  e  $\beta$  escalares.

Assim,

$$\theta(t) = 2\pi \int f(t) dt = \pi\beta t^2 + 2\pi\alpha t. \quad \text{Equação 3.8}$$

Logo,

$$x(t) = \cos(\pi\beta t^2 + 2\pi\alpha t) = x(nT_s) = \cos(\pi\beta T_s^2 n^2 + 2\pi\alpha T_s n), \quad \text{Equação 3.9}$$

em que  $n$  é o índice da amostra e  $T_s$  o período de amostragem.

Substituindo na Equação 3.7 os instantes de tempo em que começa e acaba o *chirp*, respectivamente 0 e  $T_{final}$ , vem:

$$\begin{cases} f(0) = \alpha = f_0 \\ f(T_{final}) = \beta \cdot T_{final} + f_0 = f_1 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \alpha = f_0 \\ \beta = \frac{f_1 - f_0}{T_{final}} \end{cases}, \quad \text{Equação 3.10}$$

sendo  $f_0$  e  $f_1$  as frequências inicial e final do *chirp*, respectivamente.

Com base nestas equações foi preparado um *script MATLAB* (presente no *Anexo A*) para gerar *chirps* lineares. Como se pode depreender da análise do código, o utilizador insere os seguintes parâmetros de entrada da função (relativos ao *chirp*): frequência inicial, frequência final, duração e frequência de amostragem.

### 3.5.2.4 Varrimento em Frequência Logarítmico

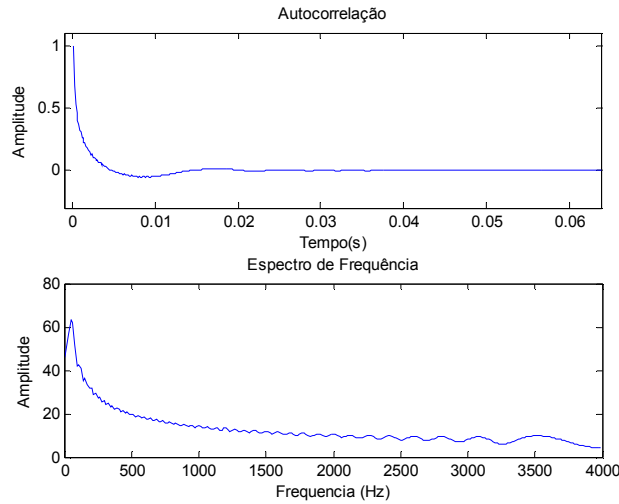
O varrimento em frequência (*chirp*) logarítmico partilha quase todas as características do *chirp* linear. A grande diferença é que a variação da frequência do sinal sinusoidal ao longo do tempo ocorre, não de forma linear, mas de forma logarítmica.

Esta diferença traduz-se numa maior duração das baixas frequências e menor duração das altas frequências. A grande implicação que daí advém é que o espectro do *chirp* logarítmico é mais energético às baixas frequências (Figura 3.14). Esta característica é



vantajosa na medida em que, na generalidade dos sistemas a medir, o ruído tem a sua energia concentrada às baixas frequências. Logo, a utilização do *chirp* logarítmico em detrimento do *chirp* linear leva a uma melhor SNR. O *chirp* logarítmico é, portanto, a melhor opção para medições de RIR [9].

Na Figura 3.14 apresentam-se os gráficos da autocorrelação e do espectro de frequência do *chirp* logarítmico.



**Figura 3.14: Autocorrelação e espectro de frequência do *chirp* logarítmico**

Segue-se a dedução da equação geral dum sinal deste tipo.

Partindo da Equação 3.11:

$$x(t) = \sin(\theta(t)) = \sin(2\pi f(t)t). \quad \text{Equação 3.11}$$

Sabendo que a frequência vai agora variar de forma logarítmica ao longo do tempo, tem-se [9]:

$$\theta(t) = K \left( e^{\frac{t}{L}} - 1 \right). \quad \text{Equação 3.12}$$

Logo,

$$f(t) = \frac{\partial(\theta(t))}{\partial t} \cdot \frac{1}{2\pi} = K \cdot \frac{e^{\frac{t}{L}}}{L} \cdot \frac{1}{2\pi}. \quad \text{Equação 3.13}$$

Substituindo na Equação 3.13 os instantes de tempo em que começa e acaba o *chirp*, respectivamente 0 e  $T_{final}$ , vem:

$$\begin{cases} f(0) = \frac{K}{2\pi L} = f_0 \\ f(T_{final}) = K \cdot \frac{e^{\frac{T_{final}}{L}}}{L} \cdot \frac{1}{2\pi} = f_1 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} L = \frac{T_{final}}{\ln\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} \\ K = \frac{2\pi f_0 T_{final}}{\ln\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} \end{cases}, \quad \text{Equação 3.14}$$

sendo  $f_0$  e  $f_1$  as frequências inicial e final do *chirp*, respectivamente.

Substituindo  $K$  e  $L$  na Equação 3.12, tem-se:

$$\theta(t) = \frac{2\pi f_0 T_{final}}{\ln\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} \cdot \left( e^{\frac{t}{T_{final}} \cdot \ln\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} - 1 \right). \quad \text{Equação 3.15}$$

Logo,

$$x(t) = \sin \left[ \frac{2\pi f_0 T_{final}}{\ln\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} \cdot \left( e^{\frac{t}{T_{final}} \cdot \ln\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} - 1 \right) \right] \quad \text{Equação 3.16}$$

No *Anexo A* apresenta-se o código *MATLAB* utilizado para gerar o *chirp* logarítmico. Como se pode observar, trata-se duma função exactamente com os mesmos parâmetros de entrada da função geradora do *chirp* linear (secção 3.5.2.3).

## 4 *Robot* de Captação de Som

O *Robot* de Captação de Som integra um sistema de posicionamento mecânico do microfone e um sistema áudio para injeção de som na sala e captação da correspondente resposta. Ambos os sistemas são controlados por um computador (PC de controlo).

### 4.1 Sistema de Posicionamento

O sistema de posicionamento remoto do microfone baseia-se numa plataforma mecânica, com possibilidade de deslocamento no plano horizontal segundo dois eixos, que designaremos de Plataforma XY.

#### 4.1.1 Plataforma XY

Na Figura 4.1 apresenta-se uma imagem da referida plataforma.

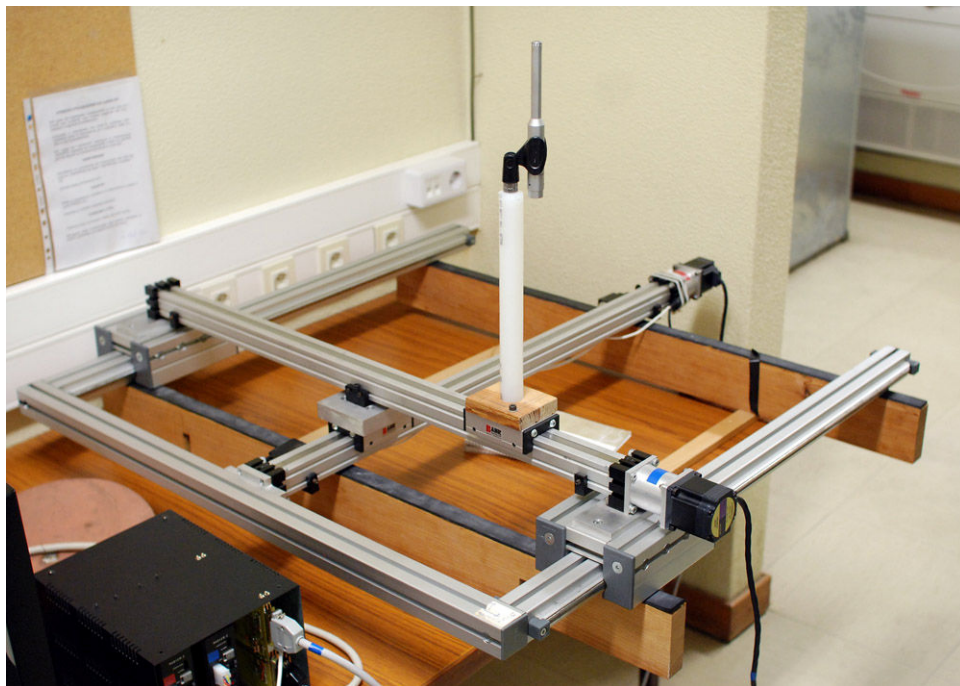
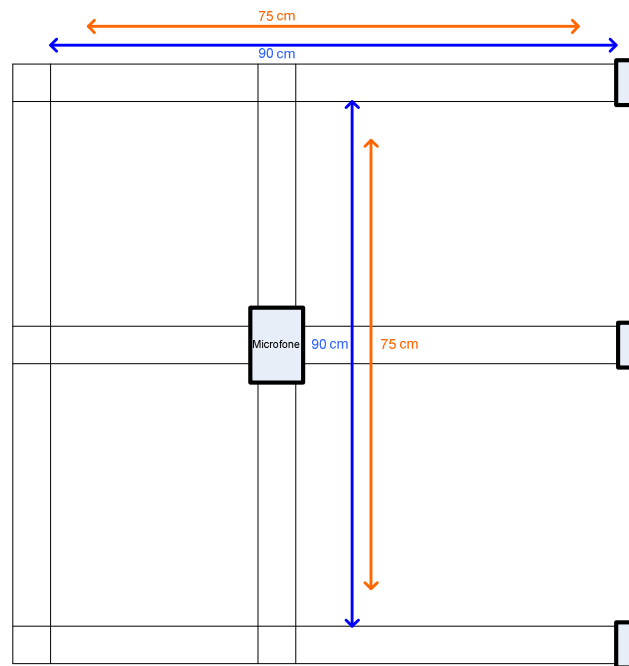


Figura 4.1: Fotografia da Plataforma XY

Os dois eixos de posicionamento linear encontram-se montados perpendicularmente, um sobre o outro e são accionados por dois motores (um para cada eixo) de passo. Na Figura 4.2 apresenta-se um esquema deste sistema com as respectivas dimensões.

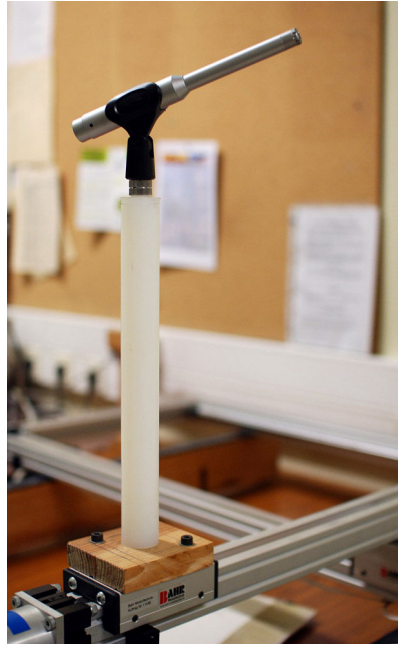


**Figura 4.2: Esquema da Plataforma XY com as suas dimensões**

Como se pode observar, cada eixo tem um comprimento ao longo do qual o microfone se pode movimentar, de cerca de 90cm, dos quais 75 foram aproveitados como distância útil. O microfone (fixo no ponto de intersecção dos dois eixos) pode assim movimentar-se dentro duma área de cerca de  $5625\text{cm}^2$ . Esta limitação é imposta pelo *software* de controlo. Desta forma, garante-se que nenhum dos eixos atinge os extremos, ficando, na situação limite, afastados destes cerca de 7,5cm (distância de segurança).

Refira-se que a Plataforma XY foi inicialmente adquirida para realizar experiências com sistemas rádio móvel como é descrito em [10]. Por isso não possibilita posicionamento em altura (segundo *Z*), que seria importante para este trabalho. De futuro perspectiva-se adicionar mais esse grau de liberdade ao sistema ou até construir, de raiz, um novo *Robot* de Captação de Som com cinco eixos, possibilitando o posicionamento do microfone em *X*, *Y*, *Z*, azimuth e elevação.

Para que a Plataforma XY pudesse posicionar microfones foi-lhe adicionado o suporte que se observa na Figura 4.3.



**Figura 4.3: Suporte que permite o acoplamento de microfones à plataforma**

Este suporte termina numa rosca universal (ver Figura 4.4) que permite que seja acoplado à Plataforma XY qualquer tipo de microfone.

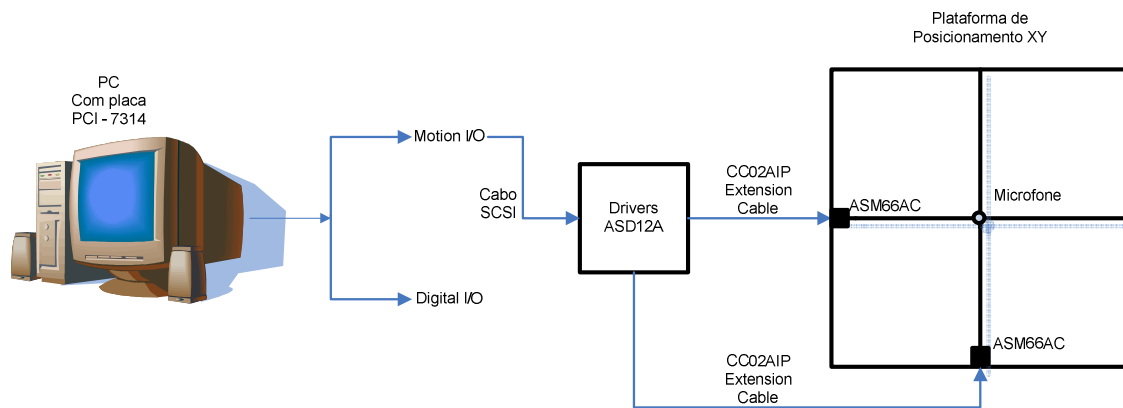


**Figura 4.4: Terminação do suporte de microfones em rosca universal**

#### **4.1.2 Hardware de Controlo**

Cada um dos eixos da Plataforma XY é accionado por um motor passo a passo VEXTA<sup>®</sup> ASM66AC. Estes motores são controlados pelos *drivers* ASD12A da mesma marca [11], sendo a interface destes com o PC de controlo garantida pelos controladores PCI

(*Peripheral Component Interconnect*) – 7314 da *National Instruments* [12]. Estes controladores, como é fácil perceber pelo seu nome, são ligados a um *slot* PCI do computador e disponibilizam duas portas de comunicação VHDCI (*Very High Density Cable Interconnect*) de 68 pinos designadas por *Motion I/O* e *Digital I/O*. Os *drivers* ASD12A ligam-se à porta *Motion I/O* através dum cabo SCSI (*Small Computer System Interface*). Os motores comunicam com os seus *drivers* através dum cabo CC02AIP. A Figura 4.5 esquematiza as ligações descritas.

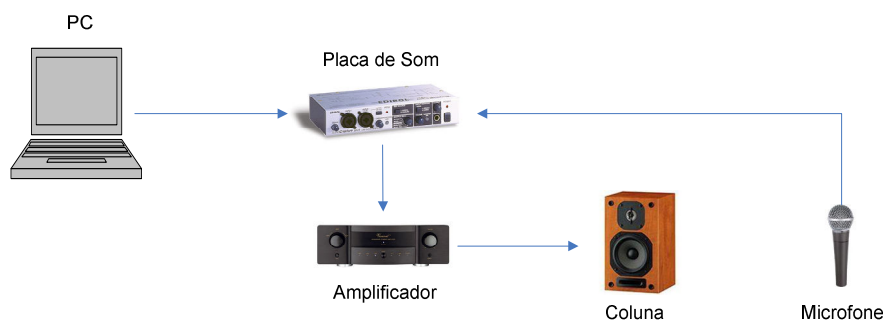


**Figura 4.5: Esquema de controlo da Plataforma XY**

Note-se que a porta *Digital I/O* acima referida não é necessária para o tipo de controlo que se pretende efectuar neste trabalho.

## 4.2 Sistema Áudio

Este sistema baseia-se numa placa de som externa à qual se ligam os elementos necessários à reprodução e captação do som (amplificador, coluna e microfone). A Figura 4.6 representa o diagrama de blocos do sistema áudio.



**Figura 4.6: Diagrama de blocos do sistema áudio**

Como se pode observar, a placa de som tem ligado, a uma das suas entradas, o microfone que será acoplado à Plataforma XY. Uma das suas saídas encontra-se ligada à entrada do amplificador que, por sua vez, vai ligar uma coluna de som para injectar na sala sinais áudio enviados pelo PC.

De entre os elementos que fazem parte do sistema áudio dar-se-á especial destaque ao microfone, uma vez que este é o elemento mais importante quando se trata de realizar uma captação de som. De facto, se não se dispuser de um microfone adequado, a gravação será, forçosamente, de fraca qualidade, independentemente da qualidade do restante equipamento [13].

#### 4.2.1 Microfones

Um microfone é um tipo de transdutor, isto é, um dispositivo que converte a energia que recebe noutro tipo de energia. Mais concretamente, o microfone transforma a pressão acústica que incide sobre o seu diafragma num sinal eléctrico passível de ser amplificado e processado por outros dispositivos.

Existem dois tipos diferentes de microfones: dinâmicos e de condensador [13].

- Os do tipo dinâmico consistem num diafragma fino que se encontra encaixado numa bobina (feita de um material condutor) que está imersa num forte campo magnético. Quando a onda sonora atinge o diafragma, este move-se para dentro e para fora o que resulta em movimento da bobina. Esta, ao movimentar-se dentro do campo magnético (fixo), faz com que surja uma diferença de potencial aos seus terminais – sinal de saída. A Figura 4.7 ajuda a compreender o funcionamento deste tipo de microfones.

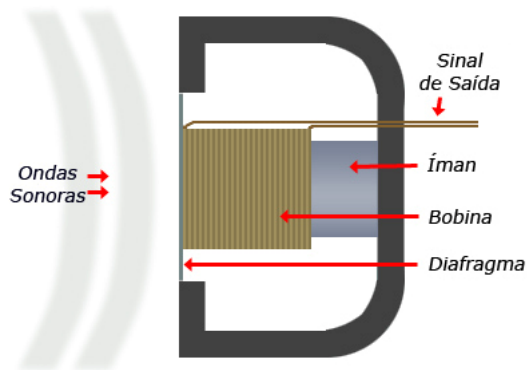


Figura 4.7: Esquema interno de um microfone dinâmico [13]

- Os microfones de condensador consistem numa lâmina metálica que é fixa muito próximo do diafragma fazendo com que entre estes dois elementos exista uma carga eléctrica polarizada, ou seja, o diafragma e a lâmina funcionam como as placas de um condensador. Assim, quando o diafragma se move sob a influência de ondas sonoras, a diferença de potencial entre este e a lâmina varia – sinal de saída. A Figura 4.8 mostra o esquema interno dum microfone de condensador.

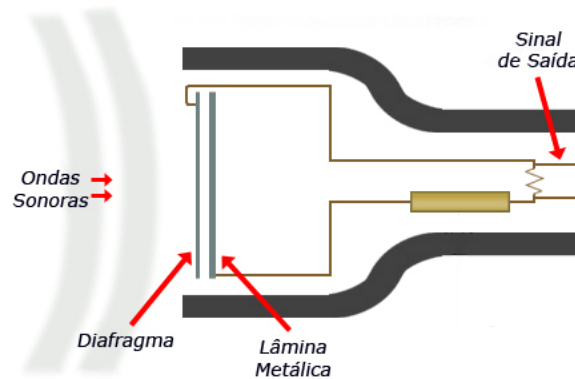


Figura 4.8: Esquema interno dum microfone de condensador [13]

Note-se que este tipo de microfone é, normalmente, alimentado por uma fonte externa de 48V denominada *phantom power*. Esta fonte de energia, na maioria das vezes, é fornecida pelo equipamento ao qual se liga o microfone.

#### 4.2.1.1 Escolha do Microfone

Para escolher o microfone que mais se adequa a determinada captação torna-se necessário conhecer as suas características, de entre as quais se destacam a directividade, a impedância e a resposta em frequência [13].

##### Directividade

A directividade é uma das características mais importantes dos microfones e, consoante esta, os mesmos podem ser classificados como:

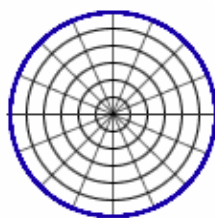
- Omnidireccionais
- Bidireccionais
- Unidireccionais



De um modo geral podem definir-se estes três tipos de microfones da seguinte forma: os microfones omnidireccionais captam o som de igual forma em todas as direcções; os bidireccionais captam som, predominantemente, em duas direcções opostas; e os unidireccionais captam som, predominantemente, numa só direcção. Neste último grupo incluem-se os microfones cardióides e supercardioides.

Uma forma simples de o utilizador compreender qual o comportamento do microfone no que respeita à directividade consiste em analisar o diagrama polar do mesmo. O diagrama polar é um traçado que indica as direcções, no espaço, segundo as quais um microfone capta energia.

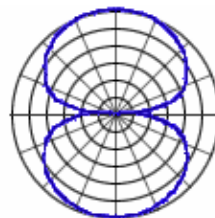
Um microfone omnidireccional possui um diagrama polar semelhante ao da Figura 4.9.



**Figura 4.9: Diagrama polar dum microfone omnidireccional [13]**

Este tipo de microfone é útil, principalmente, quando se pretendem realizar gravações em que o som provém de várias direcções diferentes ou em situações em que se pretende que o microfone seja mantido na mesma posição enquanto a fonte sonora se move. Assim, pode considerar-se este microfone como o mais adequado ao tipo de medições que se pretendem realizar no âmbito deste trabalho.

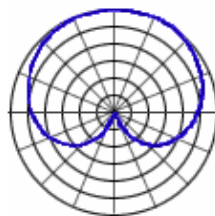
A Figura 4.10 mostra o diagrama polar dum microfone bidireccional.



**Figura 4.10: Diagrama polar dum microfone bidireccional [13]**

Este tipo de microfone pode ser útil numa entrevista ou debate em que duas pessoas se encontram frente a frente com um único microfone entre elas para captar o discurso de ambas.

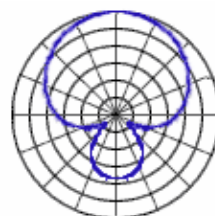
Na Figura 4.11 apresenta-se o diagrama polar dum microfone unidireccional cardióide.



**Figura 4.11: Diagrama polar dum microfone unidireccional cardióide [13]**

Como se pode observar no diagrama, o microfone unidireccional cardióide capta, principalmente, o som proveniente da direcção frontal, mas também capta algum som proveniente das direcções laterais sendo, no entanto, muito menos sensível para este último caso.

Finalmente, na Figura 4.12, apresenta-se o diagrama polar dum microfone unidireccional supercardióide.



**Figura 4.12: Diagrama polar dum microfone unidireccional supercardióide [13]**

Este tipo de microfone pode ser visto como um microfone cardióide de precisão acrescida. Trata-se dum microfone bastante direccional, que quase não capta os sons provenientes das direcções laterais e traseira. Este tipo de microfone torna-se, por isso, bastante útil quando se pretende captar um som específico num ambiente rodeado de ruídos.

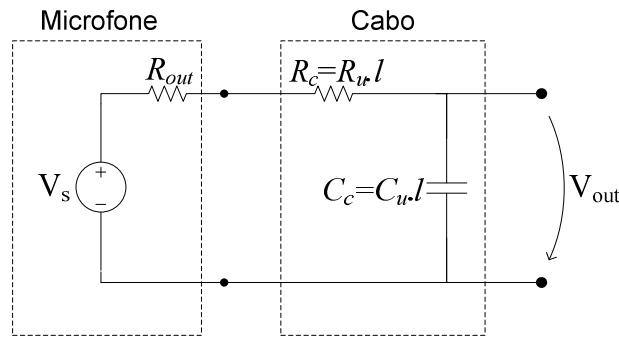
### **Impedância**

Outra das principais características a ter em conta na escolha do microfone adequado é a sua impedância de saída, representada na Figura 4.13 por  $R_{out}$ , pois é essencialmente

resistiva. Os microfones são normalmente classificados sob este ponto de vista como sendo de:

- Baixa Impedância ( $R_{out} < 600 \Omega$ )
- Média Impedância ( $600 \Omega < R_{out} < 10.000 \Omega$ )
- Alta Impedância ( $R_{out} > 10.000 \Omega$ )

Naturalmente, para transmitir o sinal captado é necessário ligar o microfone a um cabo. Essa situação é representada na Figura 4.13; os parâmetros  $R_c$  e  $C_c$  são proporcionais ao comprimento do cabo,  $l$ , e  $R_u$  e  $C_u$  representam respectivamente resistência e capacidade por unidade de comprimento.



**Figura 4.13: Circuito equivalente de um microfone ligado a um cabo**

O circuito da Figura 4.13 comporta-se como um filtro RC passa-baixo cuja frequência de corte é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi(R_{out} + R_c)C_c} . \quad \text{Equação 4.1}$$

A resistência do cabo ( $R_c$ ) é muito pequena relativamente à do microfone ( $R_{out}$ ), pelo que pode ser desprezada, podendo então rescrever-se a expressão anterior da seguinte forma:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{out} C_c} . \quad \text{Equação 4.2}$$

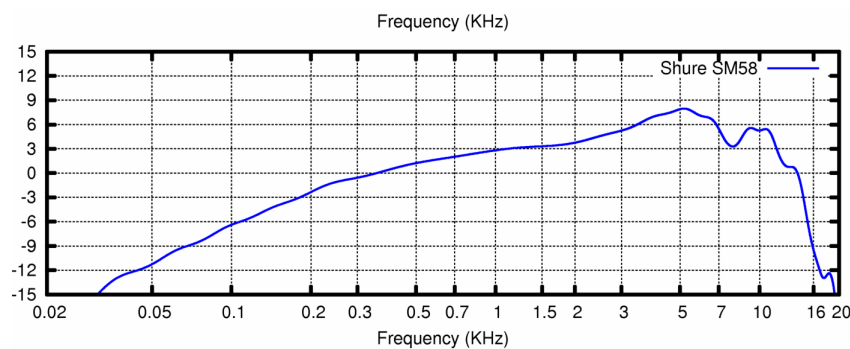
É obviamente desejável que  $R_{out}$  seja tão baixa quanto possível. De facto, a utilização de microfones com impedância elevada agrava a atenuação do sinal às altas frequências provocada pela influência de  $C_c$  em cabos compridos. Por exemplo, se se ligar um

microfone com  $R_{out} = 10k\Omega$  a um cabo com 10m de comprimento, cuja capacidade por unidade de comprimento vale, tipicamente,  $C_u = 100pF/m$ , a frequência de corte toma o valor  $f_c \approx 16kHz$ , o que não é desejável pois interfere na banda áudio (20Hz a 20kHz).

### Resposta em Frequência

A resposta em frequência é outro aspecto importante que deve ser tomado em conta quando se escolhe um microfone. Esta traduz a forma como o microfone responde às diferentes frequências que são emitidas. Em qualquer microfone há frequências que são amplificadas e outras que são atenuadas. Por exemplo, se se utilizar um microfone com uma resposta da qual se diz que favorece as altas frequências, a gravação soará mais aguda que o sinal original.

Na Figura 4.14 apresenta-se o gráfico da resposta em frequência dum determinado microfone (Shure SM58).



**Figura 4.14: Gráfico da resposta em frequência do microfone Shure SM58**

Como se pode observar, no eixo  $x$  está representada a frequência, em kHz, e no eixo  $y$ , está representado o ganho em dB.

Quanto mais plana é a resposta em frequência mais fiel será a gravação. Na prática, a resposta em frequência nunca é completamente plana, isto é, o microfone nunca é igualmente sensível a todas as frequências.

Apesar de, em alguns casos, a resposta plana ser desejável, há também várias situações em que este tipo de resposta é preterido. Por exemplo, se se pretender captar discurso num ambiente com ruído nas baixas frequências, será melhor ter um microfone cuja resposta em

frequência favoreça as frequências da voz humana e atenua as restantes. Resumindo, o importante é escolher um microfone mais sensível às frequências que se querem captar.

#### 4.2.1.2 Posicionamento do Microfone

Além de se utilizarem microfones adequados às gravações que se desejam efectuar, é necessário colocá-los no ponto certo.

O correcto posicionamento do microfone depende fortemente das características da fonte sonora e do espaço em que se está a realizar a gravação. A fonte sonora, tipicamente, é a voz ou um instrumento musical, estando o posicionamento do microfone dependente não só do instrumento mas também do músico que o está a tocar (não existem dois instrumentistas que toquem da mesma forma). Quanto ao espaço em que é realizada a gravação, também tem grande influência no posicionamento do microfone e, consequentemente, na qualidade da captação de som. Dependendo das características arquitectónicas do espaço, as reflexões irão variar, como é explicado de seguida.

A resposta em frequência de uma sala, para um dado posicionamento de fonte e receptor, é dada pela Transformada de *Fourier* (FFT) da RIR correspondente. A curva de amplitude da FFT é muito importante na caracterização de qualquer sistema LTI (como é o caso da sala – secção 3). Os seus máximos relativos (modos) ocorrem para frequências  $f_m$  (ditas de ressonância). Estas ressonâncias estão associadas a ondas estacionárias, que se formam onde o trajecto entre superfícies reflectoras é múltiplo de  $\lambda_m/2$  ( $\lambda_m$  representa o comprimento de onda  $\lambda_m = c / f_m$ , sendo  $c$  a velocidade do som). Nessas condições, o padrão de interferência entre ondas incidentes e reflectidas é tal que os pontos de excursão nula (zeros) e máxima permanecem fixos no espaço (daí a designação de “ondas estacionárias”), sendo denominados respectivamente nós e anti-nós. Este comportamento modal das salas é particularmente notório na região de baixas frequências [14].

A tarefa de posicionar microfones reveste-se, então, duma grande complexidade, o que leva a que seja realizada por técnicos de som. Estes profissionais executam a sua tarefa utilizando critérios bastante subjectivos que, na sua maioria, não estão explicados cientificamente. Embora haja alguns pressupostos teóricos que devem ser tidos em conta durante o posicionamento do microfone, há sempre decisões que são tomadas segundo critérios empíricos.

Um dos objectivos a longo prazo do projecto *Fortius* é conseguir traduzir estes critérios empíricos em dados científicos, para que se possam criar algoritmos que possibilitem um posicionamento automático de microfones.

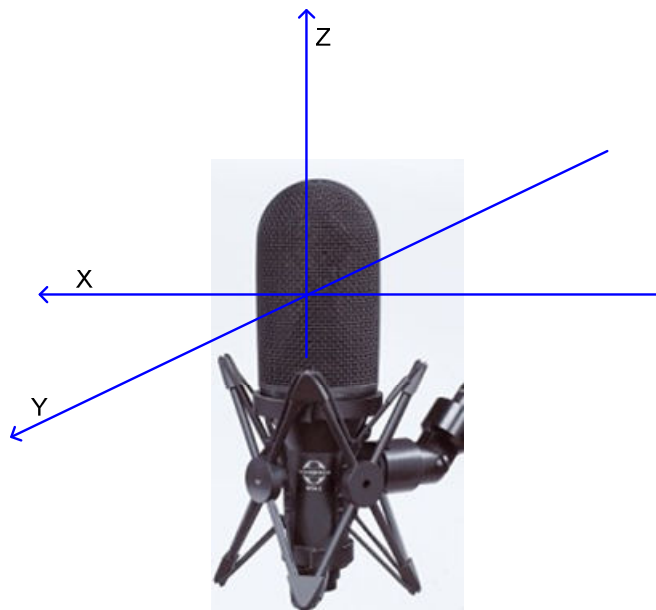
#### 4.2.1.3 Soluções Existentes no Mercado

No mercado não há registo de quaisquer sistemas que realizem posicionamento automático de microfones, não havendo sequer publicações de estudos feitos nesse sentido. No entanto, existe um produto comercial que merece atenção pois, apesar de não ter a mesma finalidade deste estudo, está de alguma forma relacionado com ele.

Trata-se dum sistema constituído por um microfone e um processador denominado *MKV SoundField* [15]. O microfone apresenta a particularidade de ser constituído por quatro cápsulas dispostas de forma tetraédrica (Figura 4.15). Cada uma dessas cápsulas vai gravar um sinal diferente quando for realizada uma captação de som. Assim, têm-se quatro sinais que, após serem analisados e transformados pelo processador, passam a estar num formato denominado *B – Format*. Isto significa que três desses sinais (X, Y e Z) armazenarão informação relativa às direcções indicadas na Figura 4.16 e o quarto sinal (W) guardará informação relativa à pressão acústica, correspondendo ao que se obteria com um microfone omnidireccional.

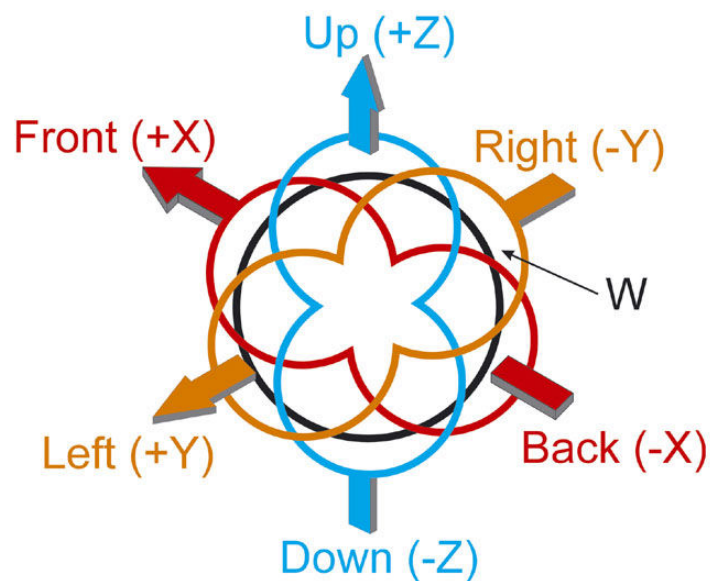


Figura 4.15: Disposição tetraédrica das 4 cápsulas do sistema *MKV SoundField* [16]



**Figura 4.16:** Esquemática espacial dos sinais X, Y e Z do *B-Format*

A Figura 4.17 esquematiza todos os sinais (X, Y, Z, W) do *B – Format*.



**Figura 4.17:** Esquemática espacial dos sinais X, Y, Z, W do *B-Format* [16]

Com este sistema é possível construir o sinal correspondente à captação que se obteria com o microfone a apontar para qualquer ponto do espaço, bastando, para isso, combinar os sinais X, Y, Z e W em diferentes proporções.

### 4.3 Controlo do Sistema

Dado que se dispunha de *hardware* de interface entre PC e motores fabricado pela *National Instruments*<sup>2</sup>, optou-se por controlar o sistema utilizando o *software LabVIEW*, propriedade dessa marca. Este *software* inclui já as bibliotecas necessárias ao controlo do referido *hardware* de interface. Uma vez escolhido este *software* para controlar o sistema de posicionamento, faz sentido utilizá-lo também no controlo do sistema áudio já que estes dois sistemas funcionarão em conjunto. Na secção seguinte dar-se-á uma breve explicação do que é o *LabVIEW*.

#### 4.3.1 LabVIEW

O *LabVIEW* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é um *software*, criado pela *National Instruments* em 1986, que pode correr sob os sistemas operativos *Windows*, *Linux* e *Mac OS X*. Este *software* define-se como um ambiente de programação que utiliza, para a concepção dos seus programas, uma linguagem gráfica [17]. Essa linguagem denomina-se *Graphical* (G) por ser baseada em blocos funcionais e fios que constituem as ligações entre esses blocos.

O ambiente *LabVIEW* divide-se em duas janelas – Painel Frontal e Diagrama de Blocos. O Painel Frontal é a janela que permite ao utilizador interagir com o programa, isto é, actuar controladores, introduzindo valores de entrada, e ler valores de saída, consultando indicadores. Esta é, pois, uma janela que deve ser suficientemente intuitiva para que o utilizador perceba qual o modo de funcionamento do programa e qual o seu objectivo, sem ter necessidade de olhar para o Diagrama de Blocos. A janela onde se encontra o Diagrama de Blocos é, por excelência, a janela do programador, uma vez que é o diagrama de blocos que estabelece o modo de interacção entre os vários elementos (controladores e indicadores) que estão presentes no Painel Frontal.

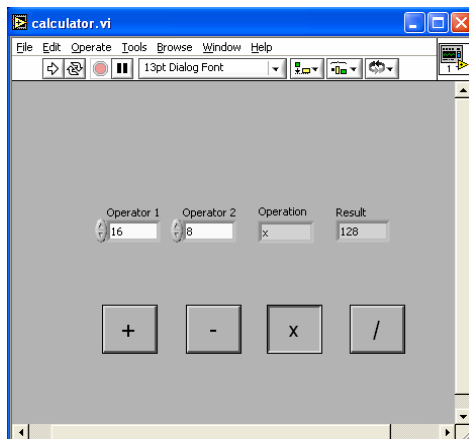
As Figura 4.18 e Figura 4.19 mostram, respectivamente, o Painel Frontal e o Diagrama de Blocos dum programa exemplo implementado em *LabVIEW*. Trata-se duma calculadora bastante simples e, como se pode observar, é fácil para o utilizador compreender como

---

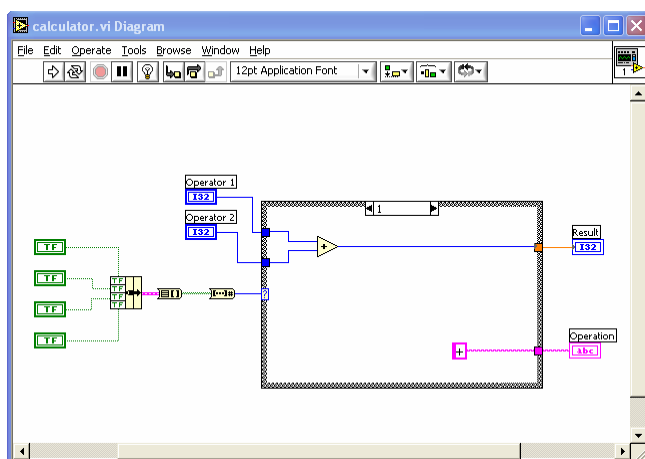
<sup>2</sup> A *National Instruments* é uma empresa americana que desenvolve *hardware* e *software* para aquisição de dados, instrumentação, teste, medida e controlo industrial.



deve interagir com o programa para obter os resultados que pretende, olhando apenas para o Painel Frontal. Por sua vez, o Diagrama de Blocos apresenta uma complexidade mais elevada, sendo passível de ser entendido apenas pelo programador.



**Figura 4.18:** Exemplo do Painel Frontal dum programa *LabVIEW*



**Figura 4.19:** Exemplo do Diagrama de Blocos dum programa *LabVIEW*

Um programa criado em *LabVIEW* denomina-se Instrumento Virtual (VI – *Virtual Instrument*).

No âmbito deste trabalho foi preparada e apresentada uma palestra no Instituto de Engenharia Electrónica e Telemática de Aveiro (IEETA), no dia 28 de Fevereiro de 2008. Pretendia-se que esta servisse de tutorial a quem se está a iniciar em *LabVIEW*. O material usado na apresentação encontra-se no *Anexo B* podendo também ser consultado em [www.ieeta.pt/palestras](http://www.ieeta.pt/palestras).

O *LabVIEW* encontra-se actualmente na versão 8.5; no entanto, para este trabalho, foi utilizada a versão 6, com a qual se desenvolveu todo o *software* de controlo do *Robot* de Captação de Som.

### 4.3.2 *Software*

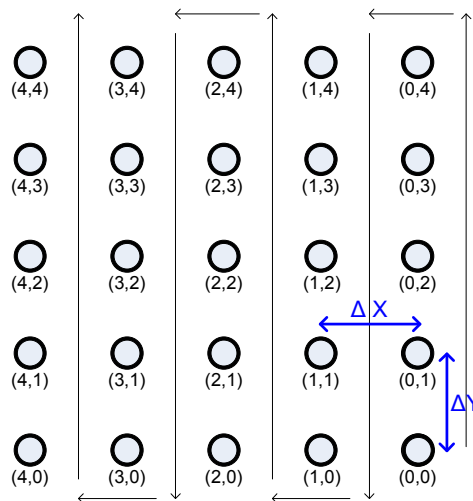
O *software* de controlo do *Robot* de Captação de Som visa dois modos de operação distintos: o Modo Matriz e o Modo *Joystick*. O primeiro permite que sejam medidas respostas impulsiais em vários pontos de uma sala, de forma automática; o segundo permite o posicionamento remoto de um microfone enquanto o mesmo capta som cuja reprodução é controlada também pelos VIs do Modo *Joystick*.

Todo este *software* pode ser consultado no *Anexo C* deste documento, sendo o seu funcionamento descrito em detalhe nas secções seguintes.

#### 4.3.2.1 Modo Matriz

O Modo Matriz nasce duma adaptação dum *software* já existente utilizado no estudo documentado em [10].

Este modo de operação permite fazer aquisições numa matriz definida pelo utilizador que escolhe qual o seu número de pontos e qual a distância entre esses pontos. Escolhidos estes parâmetros, o programa fará o varrimento de todos os pontos da matriz pela ordem indicada na Figura 4.20 fazendo, em cada um deles, uma gravação do som que é reproduzido pela coluna.



**Figura 4.20: Varrimento duma matriz genérica**

A figura anterior mostra o exemplo do varrimento duma matriz de dimensões 5 por 5 que se inicia no ponto (0,0) e termina no ponto (4,4). Após ter sido gravada a resposta no último ponto, os motores recolhem à origem.

Na Figura 4.21, apresenta-se o Painel Frontal do programa de controlo do *Robot* de Captação de Som.

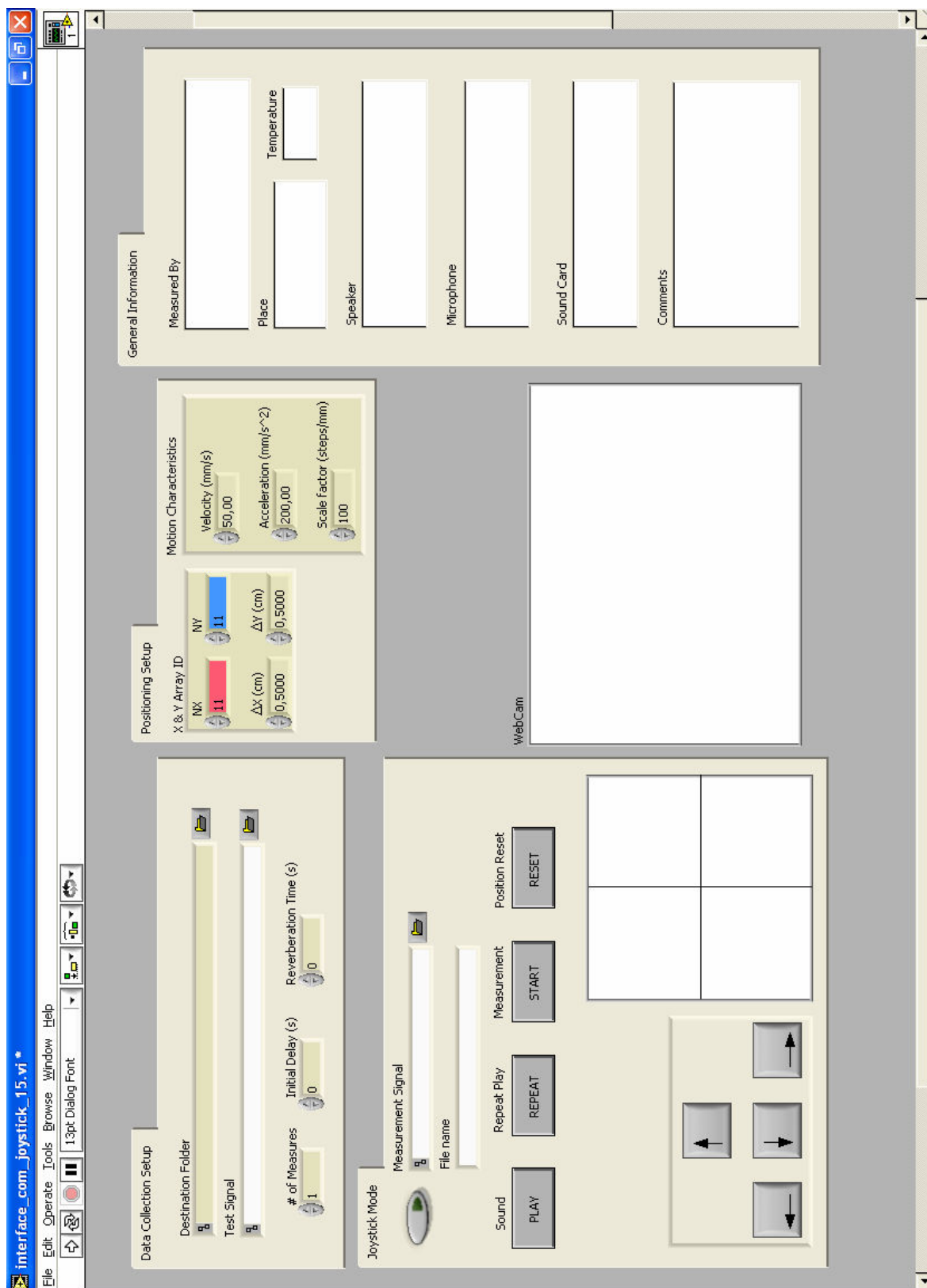


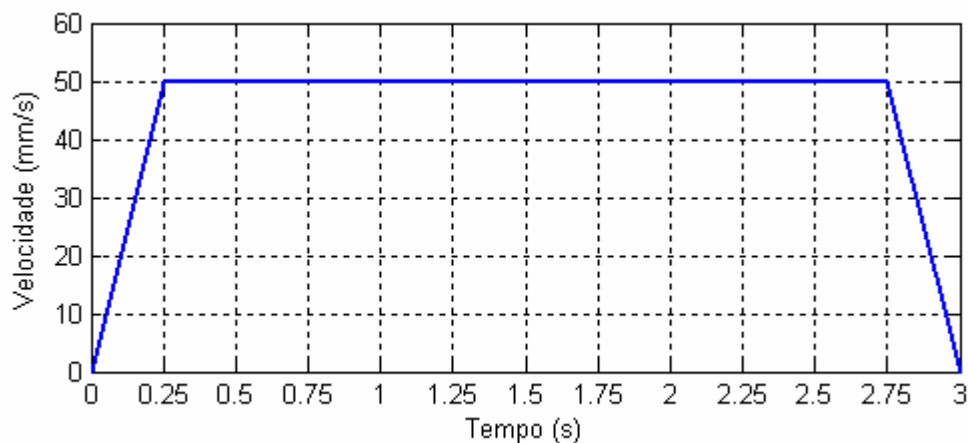
Figura 4.21: Programa de controlo do *Robot* de Captação de Som – interface com o utilizador

Pode observar-se que a interface com o utilizador possui um separador '*Positioning Setup*' no qual se definem as características da matriz. Mais concretamente, no campo '*X & Y Array ID*', é possível escolher, através dos controladores '*NX*' e '*NY*', o número de pontos em que vão ser realizadas medições, ao longo dos eixos X e Y, respectivamente. Nos controladores '*ΔX(cm)*' e '*ΔY(cm)*' é colocada a distância, em centímetros, que distarão os pontos. O funcionamento do programa prevê ainda a situação em que o utilizador escolhe um número de pontos e distância entre eles suficientemente elevados para que seja ultrapassada a distância útil de 75cm (secção 4.1.1). Quando tal acontece o utilizador é alertado para o facto do número de pontos ter sido reduzido para o máximo possível que não ultrapassa a distância se de segurança e que é encontrado através da seguinte inequação:

$$(NK - 1) \times \Delta K (cm) \leq 75cm .$$

Em que NK é o número de pontos e ΔK a distância entre eles.

O separador '*Motion Characteristics*' dá algumas indicações sobre as características do movimento realizado pelos motores. No caso particular do Modo Matriz o movimento é baseado numa variação trapezoidal da velocidade. No exemplo apresentado especificou-se uma aceleração de 200mm/s<sup>2</sup> que dura até ser atingida a velocidade de cruzeiro de 50 mm/s havendo, posteriormente, uma desaceleração de valor simétrico ao da aceleração (ver Figura 4.22).



**Figura 4.22: Representação gráfica da variação da velocidade aplicada aos motores ao longo do tempo, no Modo Matriz, durante 3 segundos**

A figura acima representa a variação da velocidade ao longo de 3 segundos de movimento, quando os valores de aceleração e velocidade de cruzeiro são os referidos acima. Como era de esperar, os motores demoram um quarto de segundo até atingirem a velocidade de cruzeiro ( $50\text{mm.s}^{-1}/200\text{mm.s}^{-2} = 0,25\text{s}$ ), demorando o mesmo tempo desde que entram em desaceleração até pararem por completo.

O separador '*General Information*' permite ao utilizador descrever as condições em que foram realizadas as medições e fazer uma pequena listagem das características do material que se utilizou para obter as mesmas. Toda esta informação é automaticamente gravada num ficheiro de texto (*MSheet.txt*) antes da realização das medições.

O separador '*Data Collection Setup*' permite que o utilizador defina qual o sinal que será injectado na coluna para realizar as gravações (campo '*Test Signal*') e qual a pasta onde serão guardados todos os ficheiros relativos às medições (campo '*Destination Folder*'); que são o já referido *MSheet.txt* e todos os ficheiros '*.wav*'<sup>3</sup> resultantes das gravações. Escolheu-se o formato '*.wav*' para armazenar os ficheiros áudio por se tratar de um formato que pode ser facilmente editado e manipulado pelos programas utilizados neste trabalho para gravação, reprodução e tratamento de dados. Nomeadamente *LabVIEW* e *MATLAB*.

*MSheet.txt* – este ficheiro de texto tem a sua informação dividida em quatro campos:

- '*Identification*' – neste campo fica registado o nome de quem realizou as medições, data e hora em que se realizaram, o número de ensaios (número de vezes que é percorrida a matriz), o local das medições, a temperatura à qual estas foram realizadas e quaisquer comentários adicionais que o utilizador considere pertinentes;
- '*Equipment Characteristics*' – campo destinado a conter os detalhes técnicos sobre o microfone, a coluna e a placa de som que foram utilizados para fazer a medição;

---

<sup>3</sup> *wav* (ou *wave*) é a abreviatura de *waveform audio format* e trata-se de um formato de armazenamento de ficheiros áudio baseado numa modulação PCM (*Pulse Code Modulation*).

- *'Measurement Characteristics'* – este campo contém todas as características da matriz: número de pontos no eixo X, número de pontos no eixo Y, distância entre os pontos do eixo X e distância entre os pontos do eixo Y;
- *'Motion'* – é o campo que regista as características do movimento: velocidade, aceleração e factor de escala (número de passos dos motores por unidade de comprimento).

No que respeita aos ficheiros *'.wav'*, estes são gravados com um nome que segue a seguinte convenção: *outputXXXYYY-NN.wav*, em que *XXX* e *YYY* representam as coordenadas X e Y dos pontos da matriz, respectivamente, e *NN* representa o número do ensaio. Por exemplo o ponto (5,46) do 2º ensaio seria gravado com o nome: *output005046-02.wav*. Note-se também que estas coordenadas não são em unidades de comprimento. Trata-se apenas dos índices dos pontos da matriz (ver Figura 4.20). Para saber a posição exacta em que foi gravada determinada resposta há que relacionar as suas coordenadas com o espaçamento entre pontos ( $\Delta X$  ou  $\Delta Y$ ).

Existem ainda três campos na interface – *'# of Measures'*, *'Initial Delay (s)'* e *'Reverberation Time (s)'* – cujas funções se descrevem de seguida:

- *'# of Measures'* – define o número de ensaios, isto é, o número de vezes que é percorrida a matriz;
- *'Initial Delay (s)'* – define um tempo de espera antes de a experiência se iniciar. É útil no caso em que o utilizador não quer estar nas proximidades para não interferir nas medições: basta definir um valor correspondente ao tempo (em segundos) que precisa para se afastar do local da experiência;
- *'Reverberation Time (s)'* – define o tempo (em segundos) que o sistema de medição continuará a gravar após ter terminado a reprodução do som por parte da coluna. Note-se que as ondas sonoras continuam a propagar-se na sala devido às características reverberantes desta.

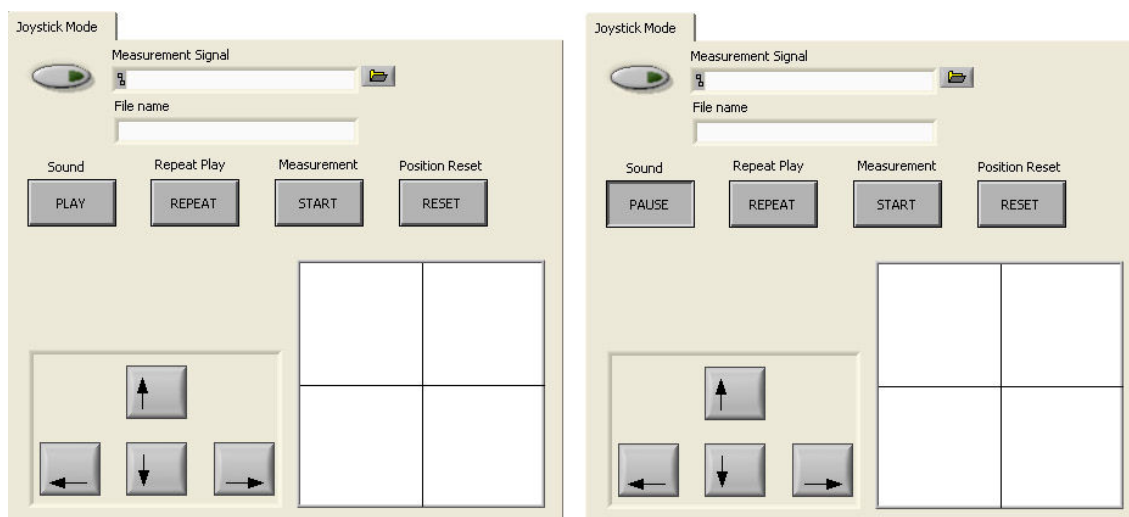
#### 4.3.2.2 Modo Joystick

Olhando ainda a Figura 4.21, mais concretamente o separador *'Joystick Mode'*, é possível observar os controladores responsáveis pelo controlo manual remoto do microfone. O

funcionamento neste modo permite ao utilizador posicionar o microfone enquanto ouve o som que este capta. Este modo permite ainda realizar uma gravação no ponto onde foi colocado o microfone. Ou seja, após o microfone ter sido posicionado, o utilizador pode querer registar a resposta impulsional nesse ponto e, para tal, bastará premir o botão ‘*Measurement – START*’ do separador ‘*Joystick Mode*’ e definir, no campo ‘*File name*’, um nome para o ficheiro que será gravado. O sinal que será utilizado para essa gravação é escolhido no campo ‘*Measurement Signal*’.

O sinal que será reproduzido pela coluna e, consequentemente, captado pelo microfone que está a ser posicionado, é escolhido no campo ‘*Test Signal*’ do separador ‘*Data Collection Setup*’. Note-se que este separador é utilizado por ambos os modos (Matriz e *Joystick*), o que não traz qualquer problema visto que estes dois modos nunca podem ser executados em simultâneo. Se o botão presente no canto superior esquerdo do separador ‘*Joystick Mode*’ estiver activo está-se em Modo *Joystick*, caso contrário está-se em Modo Matriz.

O utilizador dá indicação para que se inicie a reprodução do ‘*Test Signal*’ premindo o botão ‘*Sound – PLAY*’, este altera a sua forma (ver Figura 4.23), significando que, sempre que o utilizador desejar pausar a reprodução do ‘*Test Signal*’, bastará premir o “novo” botão ‘*Sound – PAUSE*’. A interface tem também um botão (‘*Repeat Play – REPEAT*’) que permite ao utilizador reiniciar a reprodução do ‘*Test Signal*’ caso esta tenha terminado antes de o microfone ter sido posicionado.



**Figura 4.23: Alteração do botão ‘*Sound – PLAY*’ / ‘*Sound – PAUSE*’ do separador ‘*Joystick Mode*’ da interface com o utilizador**



O movimento dos motores, no Modo *Joystick*, pode ser executado de duas formas: com as setas ou com o gráfico que se encontra à direita destas. Estes dois modos de operação funcionam da seguinte forma:

Setas – o utilizador deve premir uma das setas (com o cursor do rato) consoante o eixo que deseja ver em movimento e o sentido em que quer que o mesmo se mova. Neste modo só é possível movimentar um eixo de cada vez, sendo o movimento executado segundo uma variação trapezoidal da velocidade como a que se descreve na secção 4.3.2.1 (Figura 4.22). Quando a seta é premida o motor entra na rampa de aceleração. Quando o utilizador solta a seta o motor entra na rampa de desaceleração.

Gráfico – este modo simula um *joystick* em que o utilizador coloca o cursor do rato num dos quadrantes do gráfico, consoante o sentido em que quer que os motores se movam. Note-se que neste modo é possível movimentar os dois motores em simultâneo. Quanto à velocidade e aceleração, deixam de ser constantes para serem tanto maiores quanto mais longe do centro do gráfico for colocado o cursor, ficando o utilizador, desta forma, com total controlo sobre a velocidade com que os motores se movimentam.

Também aqui o movimento é realizado segundo uma variação trapezoidal da velocidade, sendo iniciado quando o botão do rato é premido e entrando em desaceleração quando o mesmo é solto.

Existe ainda um separador denominado ‘*WebCam*’ que pode receber imagens duma câmara. Este modo é útil no caso em que o utilizador está a controlar a Plataforma XY sem a poder ver, pois permite que ela seja monitorizada pela câmara.

Finalmente, existe um botão ‘*Position Reset*’ que tem como finalidade fazer com que os motores retornem à posição inicial. O funcionamento deste botão apresenta, no entanto, algumas limitações que serão abordadas mais à frente.

#### **4.3.2.3 Modo Posição e Modo Velocidade**

As bibliotecas *LabVIEW* que foram utilizadas para controlar os motores que movimentam os eixos da Plataforma XY permitem configurar os mesmos para funcionar em dois modos distintos: Modo Posição e Modo Velocidade.

Modo Posição – neste modo os motores movimentam-se segundo o número de passos que lhes é passado como parâmetro de entrada da sua sub rotina de controlo, ou seja, os seus

valores de velocidade e aceleração são configurados *a priori*, e o utilizador apenas dá indicação da posição para a qual quer que os motores se desloquem. Uma vez que é sabido que o factor de escala é de 100 passos/mm, é fácil ter uma excelente precisão neste controlo em que o utilizador fornece a posição (em cm, por exemplo) para a qual quer que viaje o motor. Ou seja, no modo posição, o utilizador sabe sempre, com rigor, em que posição estão situados os motores.

Modo Velocidade – neste modo o utilizador limita-se a fornecer, na sub rotina de controlo dos motores, a velocidade e aceleração que devem ser imprimidas aos mesmos. Assim, os motores aceleram segundo o valor de aceleração fornecido até atingirem a velocidade de cruzeiro (também ela parâmetro de entrada). O modo de paragem é configurável podendo ser instantâneo ou em desaceleração. Como se pode inferir do que foi anteriormente descrito, neste trabalho optou-se sempre por realizar uma paragem em desaceleração já que, desta forma é minimizado um dos grandes problemas do controlo de motores passo a passo – a perda de passos.

Este modo de operação dos motores apresenta uma enorme desvantagem que é o facto de não ser possível fornecer ao utilizador uma indicação da posição em que os motores se encontram. Esta é uma limitação do hardware de controlo utilizado – controlador PCI 7314 – que é uma placa bastante antiga, havendo modelos mais recentes que já não apresentam este problema (placas das séries NI – 7330, NI – 7340 e NI – 7350, por exemplo) [18].

#### **4.3.2.4 Cálculo da Posição no Modo Joystick**

Como é fácil de deduzir, para a operação no Modo Matriz configuraram-se os motores para operarem em modo posição, já que o que é fornecido pelo utilizador é a distância entre os pontos da matriz – controlo de posição.

No Modo *Joystick*, como se pretende ter um controlo total sobre a velocidade, tem que se configurar os motores para uma operação em modo velocidade. É aqui que a limitação de *hardware* referida anteriormente toma maiores proporções, pois deixa-se de ter qualquer informação sobre a posição em que se encontram os motores e tal não é desejável.

Na tentativa de eliminar este problema criou-se um programa para fornecer os valores da posição dos motores com base nas leis do movimento.

Como se pode ver na Figura 4.24, os motores movimentam-se segundo um movimento rectilíneo uniformemente variado (nas rampas de aceleração e desaceleração) ou segundo um movimento rectilíneo uniforme (desde que é atingida a velocidade de cruzeiro até ser recebida a ordem de paragem). Assim, as equações que se utilizaram para calcular a posição foram as seguintes:

- Movimento Rectilíneo Uniformemente Variado (MRUV):

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 , \quad \text{Equação 4.3}$$

$s$  – posição actual

$s_0$  – posição inicial

$v_0$  – velocidade inicial

$t$  – tempo

$a$  – aceleração

- Movimento Rectilíneo Uniforme (MRU):

$$s = s_0 + v t , \quad \text{Equação 4.4}$$

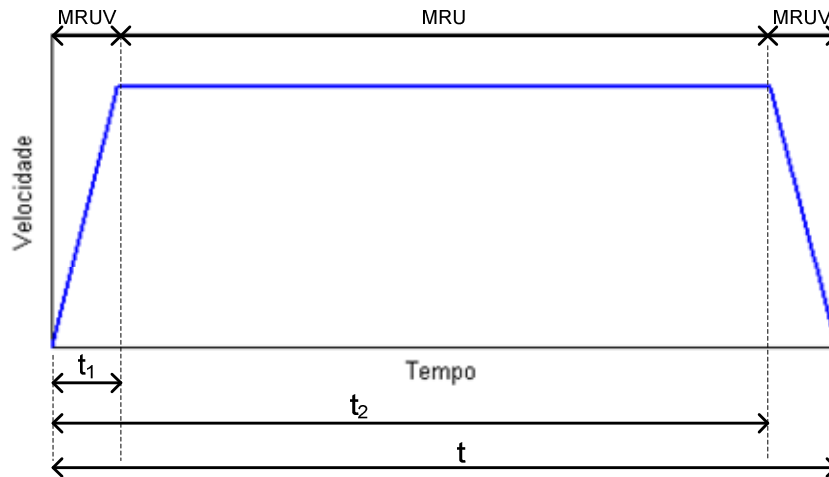
$s$  – posição actual

$s_0$  – posição inicial

$v$  – velocidade

$t$  – tempo

Estas duas equações podem ser conjugadas de forma a obter uma única equação que fornece a posição dos motores ao longo de todo o percurso. Para tal atente-se aos intervalos de tempo que estão representados na Figura 4.24.



**Figura 4.24:** Variação trapezoidal da velocidade ao longo do tempo que ocorre quando é realizado o controlo dos motores no Modo *Joystick*

A equação do movimento será então dada por:

$$s = \frac{1}{2}at_1^2 + v(t_2 - t_1) + v(t - t_2) - \frac{1}{2}a(t - t_2)^2. \quad \text{Equação 4.5}$$

Sabendo que  $t - t_2 = t_1$ , pode desenvolver-se, ficando:

$$s = \frac{1}{2}at_1^2 + vt_2 - vt_1 + vt - vt_2 - \frac{1}{2}at_1^2 = v(t - t_1) = vt_2. \quad \text{Equação 4.6}$$

Visto os valores de velocidade e de aceleração serem conhecidos o programa criado fez uso dos mesmos para calcular e actualizar constantemente a posição dos motores durante o seu movimento. No entanto, este método revelou-se pouco preciso já que os cálculos são dependentes do tempo e é impossível efectuar uma contagem do mesmo com precisão aceitável. Este problema revelou-se insolúvel não sendo, portanto, possível ter um *feedback* da posição dos motores que desse garantias de precisão. Para além disso, este problema tem implicações directas no funcionamento do já referido botão de *RESET* (ver secção 4.3.2.2), uma vez que se torna impossível fazer os eixos da plataforma retornarem exactamente ao ponto donde partiram. No capítulo seguinte serão vistas as medidas tomadas para que estas limitações não afectassem a experiência realizada e será apresentada uma solução para que, de futuro, elas não existam.

## 5 Testes e Medições Acústicas

Planificaram-se e realizaram-se vários testes e medições acústicas com vista a encontrar características indicadoras da maior ou menor qualidade de um ponto de captação de som.

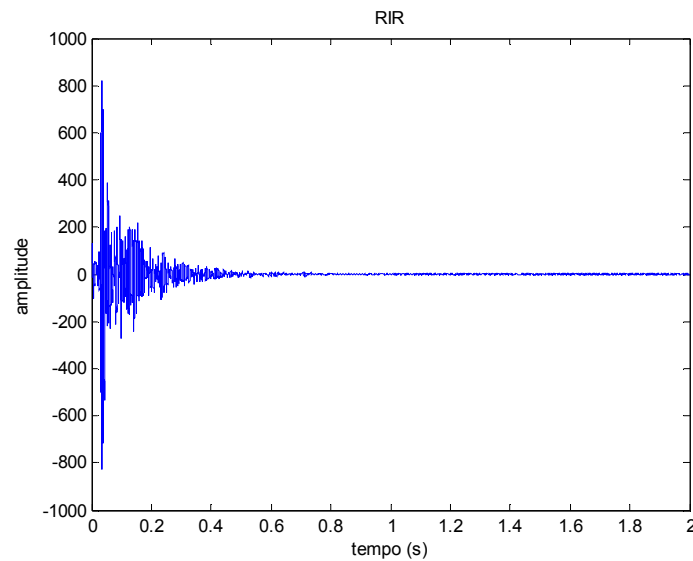
### 5.1 Matriz de Respostas Impulsionais

Uma sala pode assumir-se como um sistema LTI e, conseqüentemente, ser completamente caracterizada pela sua RIR (secção 3). Como tal, dotou-se o *Robot* de Captação de Som de um modo capaz de medir a RIR numa matriz de pontos (secção 4.3.2.1). Este sistema foi testado através da realização de várias medições na sala 345 do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (DETIUA).

Submeteram-se algumas das medições efectuadas aos algoritmos de processamento de sinal presentes no *Anexo A*.

Os resultados que foram processados referem-se a uma matriz de dimensões 10 por 10, com espaçamento entre pontos  $\Delta X = \Delta Y = 7,5$  cm. O sinal de teste utilizado nas medições foi um *chirp* linear que efectua um varrimento na gama de frequências dos 20 aos 20kHz, com uma duração de 10 segundos e frequência de amostragem de 44100Hz. No *Anexo D* encontram-se os 100 sinais gravados (matriz 10x10) bem como o ficheiro *MSheet.txt* que descreve as condições em que foram realizadas as medições (secção 4.3.2.1).

O processamento consistiu em calcular, para cada uma das 100 gravações efectuadas, a RIR pelo método da correlação. Posteriormente, calculou-se a média de todas as RIR tendo-se obtido os resultados presentes na Figura 5.1. Este cálculo da média visava apenas averiguar se, de facto, o método da correlação para cálculo da RIR estava a ser aplicado correctamente.



**Figura 5.1: Média das RIR obtidas no varrimento numa matriz 10x10 feito na sala 345 do DETIUA**

Estes resultados deverão, no futuro, ser alvo dum estudo mais detalhado, nomeadamente recorrendo a visualização 3D com a ajuda do *software* VTK<sup>4</sup>. Pretende-se, com uma adaptação de [19], construir um programa que permita visualizar de forma tridimensional a evolução das RIR adquiridas ao longo do tempo e fazer uma análise da resposta em frequência dos sinais adquiridos. Poderá extrair-se, para cada resposta em frequência da sala, a distribuição de energia em bandas de frequência para que se possa visualizar no VTK a percentagem de energia contida na banda de largura  $W$  centrada em  $f_c$ , com possibilidade de variar  $W$  e/ou  $f_c$ . Com estes e outros modos de visualização que possam vir a ser implementados espera-se conseguir relacionar o comportamento modal da sala com os pontos óptimos que serão escolhidos pelos técnicos de som.

Refira-se que foram realizadas mais medições, com diferentes sinais de teste, percorrendo matrizes de 25 pontos (5x5) e com  $\Delta X = \Delta Y = 15$  cm. Os resultados dessas medições encontram-se no *Anexo D*. Futuramente poderão realizar-se medições em matrizes mais densas de pontos. Neste trabalho optou-se por não investir tanto tempo nessa tarefa por não ser essencial, a curto prazo, dispor de tais resultados.

---

<sup>4</sup> O VTK é um *software* livre utilizado, predominantemente, para processamento de imagem e visualização 3D.

O tempo ( $t$ ) que demora a medição de uma matriz pode estimar-se através da fórmula seguinte:

$$t = n \times (t_s + t_r + t_g) + (n - 1) \times t_d, \quad \text{Equação 5.1}$$

sendo  $n$  o número de pontos da matriz,  $t_s$  a duração do sinal de teste,  $t_r$  o tempo de reverberação,  $t_g$  o tempo que demora o sinal captado pelo microfone a ser escrito na memória do PC e  $t_d$  o tempo que o *Robot* de Captação de Som demora a deslocar o microfone de um ponto da matriz para o outro. O valor  $t_g$  pode ser desprezado se se dispuser de bons recursos computacionais.

Considere-se o exemplo em que se quer medir uma matriz de 2500 pontos (50x50), numa sala cujo tempo de reverberação se estima ser de 2 segundos, utilizando um sinal de teste com 10 segundos de duração. Sabe-se da secção 4.1.1 que os eixos da Plataforma XY têm uma distância útil de 75cm, por isso pode considerar-se que cada ponto dista 1,5cm do seguinte. Assim, e sabendo que os motores se deslocam segundo o movimento que é descrito na secção 4.3.2.1, pode calcular-se  $t_d$  (aplicando a Equação 4.3 e a Equação 4.4) que terá o valor de 0,55 segundos. Desprezando  $t_g$ , tem-se então:

$$t = 2500 \times (10 + 2) + 2499 \times 0,55 = 31374,45s \approx 8,7h.$$

A Plataforma XY deverá então ser vigiada durante mais de oito horas e meia para garantir que o cabo do microfone não se enrola na plataforma. De futuro perspectiva-se a utilização dum microfone *wireless* para evitar que se tenha de vigiar a plataforma durante todo este tempo.

## 5.2 Trabalho de Campo

Para atingir o objectivo de traduzir na forma algorítmica os critérios empíricos utilizados pelos técnicos de som no posicionamento de microfones, tentar-se-iam relacionar os resultados obtidos na medição das matrizes de respostas impulsiais com os resultados de experiências de posicionamento de microfones realizadas por estes técnicos. Assim, idealizou-se uma experiência em que, fazendo uso do Modo *Joystick* do *Robot* de Captação de Som, se escolheriam os pontos óptimos de captação numa determinada sala.

### 5.2.1 Escolha do Ponto Ótimo de Captação

A escolha do ponto ótimo passa por colocar o utilizador a controlar o sistema no Modo *Joystick* (secção 4.3.2.2), navegando pelo espaço disponível da Plataforma XY, até encontrar o ponto que considera melhor para a captação de som, segundo o seu gosto pessoal – ponto ótimo.

Esta experiência só é possível se o utilizador estiver, de alguma forma, isolado da fonte sonora (coluna) para que o som que é reproduzido por esta não interfira com o som que ele vai escutando nos auscultadores (som captado pelo microfone).

A solução encontrada, para que não surgisse esse problema, tendo em conta as condições do espaço escolhido para a realização da experiência, passou por colocar o utilizador numa sala independente e afastada do local em que se encontrava o *Robot* de Captação de Som e a fonte sonora. A partir de agora denominar-se-ão esses dois espaços como: sala de audição (aquela em que o utilizador está a ouvir a gravação com os auscultadores e a posicionar remotamente o microfone); e sala de gravação (o espaço em que está presente o *Robot* de Captação a reproduzir e a captar sinais áudio).

### 5.2.2 Esquema de Montagem

A Figura 5.2 apresenta a montagem utilizada para realizar a experiência acima descrita.

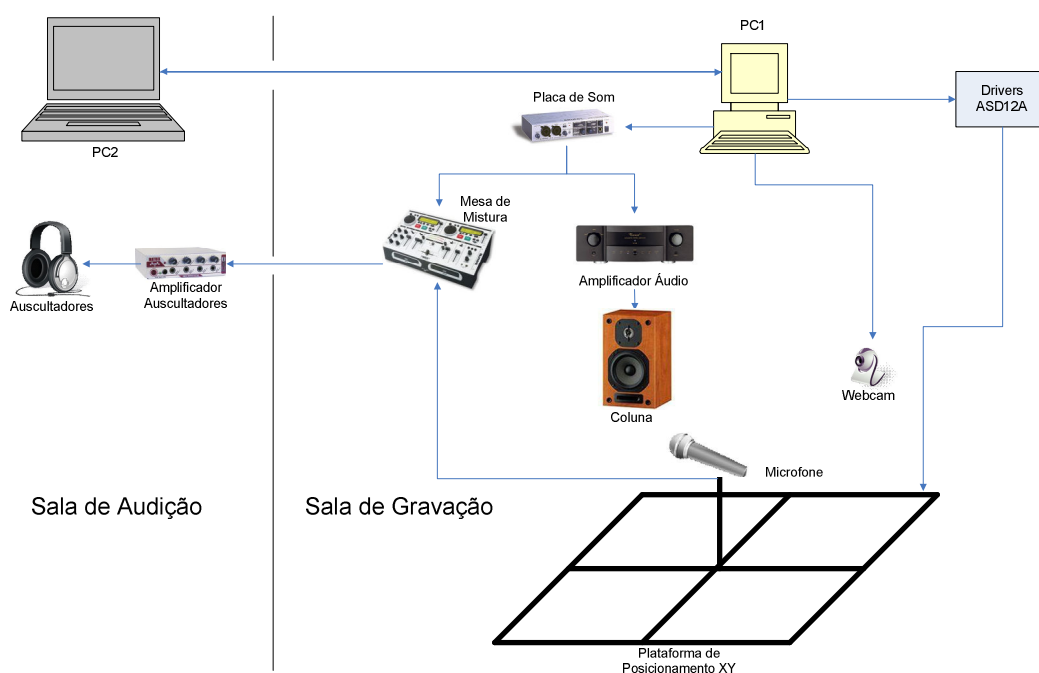


Figura 5.2: Esquema de montagem da experiência



Como se pode observar colocou-se, na sala de gravação, a Plataforma XY com o microfone acoplado, os *drivers* dos motores, a fonte sonora (coluna), o amplificador, a placa de som, a mesa de mistura e o PC equipado com *LabVIEW* (responsável pelo controlo do *Robot* de Captação de Som) – PC1. Na sala de audição colocou-se um segundo PC – PC2, para controlar remotamente o PC1, e auscultadores para que o utilizador pudesse ouvir a captação em curso. Estes auscultadores, por se encontrarem bastante longe da mesa de mistura, requerem a utilização duma ligação balanceada. Para tal colocou-se um amplificador de auscultadores na sala de audição. O controlo do PC1 por parte do PC2 realizou-se recorrendo à ferramenta *Remote Desktop Connection* do *Windows*, o que exigiu que os dois computadores estivessem ligados através dum cabo *Ethernet*. Esta ferramenta da *Microsoft* permite que o utilizador, através do PC2, faça o *login* no PC1, o que lhe possibilita ter, no PC2, o controlo absoluto do *Robot* de Captação de Som. Adicionou-se ainda ao PC1 uma *webcam* com o objectivo de monitorizar a Plataforma XY. O controlo desta câmara foi também ele efectuado com o software *LabVIEW* como é referido na secção 4.3.2.2.

### 5.2.3 Detalhes da Montagem

Para efectuar a montagem anterior utilizou-se o seguinte material:

- 2 PCs (PC1 e PC2) com sistema operativo *Windows* para poderem executar a ferramenta de comunicação *Remote Desktop Connection*. O PC1 estava também equipado com o software *LabVIEW* e com uma placa PCI – 7314 da *National Instruments* (secção 4.1.2). Foi também necessário garantir que este PC tinha 2 portas USB livres;
- *Drivers* ASD12A para controlo dos motores com o respectivo cabo de alimentação;
- Plataforma XY da qual fazem parte os motores ASM66AC;
- 1 Placa de som externa Edirol UA-5 que vem munida com transformador para alimentação e com cabo USB para ligação ao PC;
- 1 *Webcam* com ligação USB;
- 1 Amplificador áudio Grundig V304 com o respectivo cabo de alimentação;
- 1 Coluna JMLab de 2 vias (impedância = 8 $\Omega$ ; potência máxima = 75W);

- 1 Microfone do tipo condensador Behringer ECM 8000 (omnidireccional, impedância = 600Ω; resposta em frequência: 15Hz a 20kHz);
- 1 Mesa de mistura Behringer Eurorack UB 1204-PRO com o respectivo cabo de alimentação;
- 1 Amplificador para auscultadores equipado com o respectivo transformador para alimentação;
- 1 Par de auscultadores com entrada *jack* de 6,3mm;
- 1 Cabo RCA com terminação macho de ambos os lados;
- 1 Cabo RCA macho – *jack* de 6,3mm mono;
- 1 Cabo XLR fêmea – *jack* de 6.3mm;
- 2 Cabos XLR macho – XLR fêmea (um deles com 50m);
- 1 Cabo *Ethernet* cruzado com 50m de comprimento ou, em alternativa, 2 cabos directos que perfaçam um total de 50m e um *switch Ethernet* para garantir a ligação entre os PCs;
- 2 Cabos CC02AIP de ligação aos motores;
- 1 Cabo SCSI.

A montagem foi iniciada montando o sistema de posicionamento cujo esquema se encontra na Figura 4.5 da secção 4.1.2 deste documento.

Quanto à parte áudio, ligou-se a placa de som de acordo com o esquema que se apresenta na Figura 5.3. Como se pode observar, alimentou-se a placa fazendo uso do seu transformador e ligou-se a mesma:

- Ao PC1 via USB;
- Ao amplificador (que terá a si ligada a coluna de som), utilizando o cabo RCA – *jack* 6,3mm mono;
- À mesa de mistura através do cabo RCA (macho) – RCA (macho).

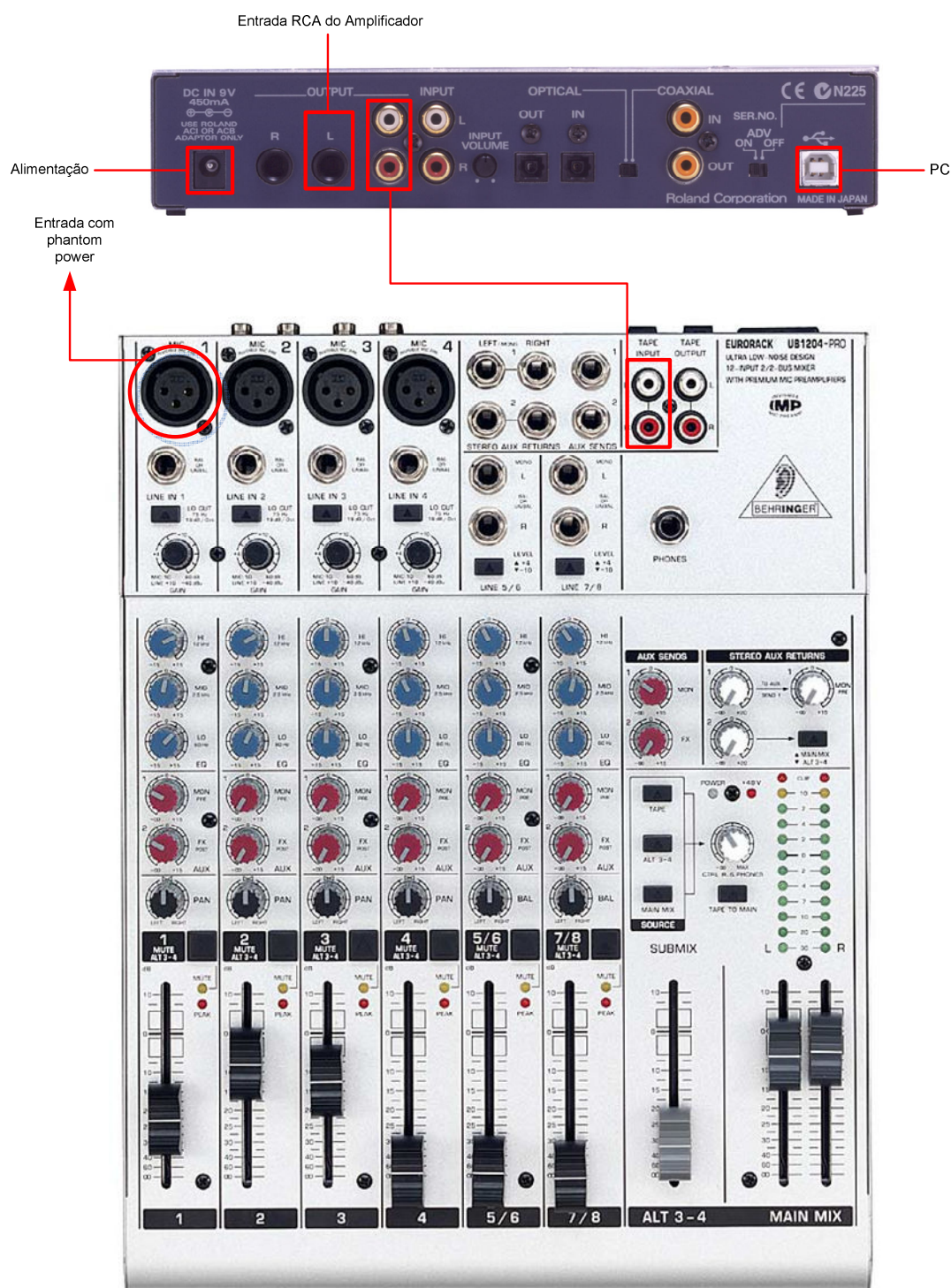


Figura 5.3: Esquema de ligação da placa de som Edirol UA-5

Ligou-se ainda o microfone na entrada da mesa assinalada na figura como contendo *phantom power* (note-se que o microfone utilizado é do tipo condensador – secção 4.2.1) utilizando, para tal, o cabo XLR (macho) – XLR (fêmea).

Utilizou-se a saída XLR (Figura 5.4) da mesa de mistura para ligar os auscultadores.

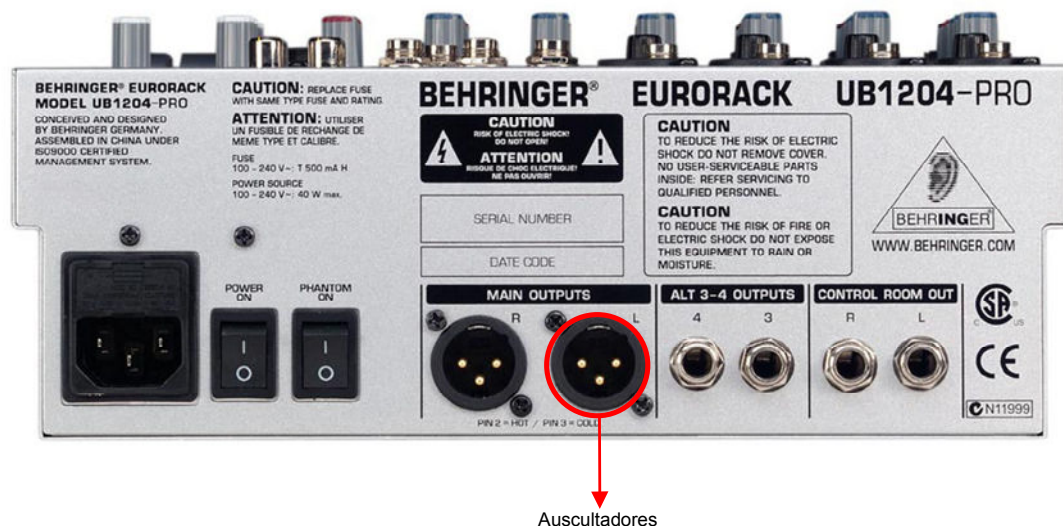


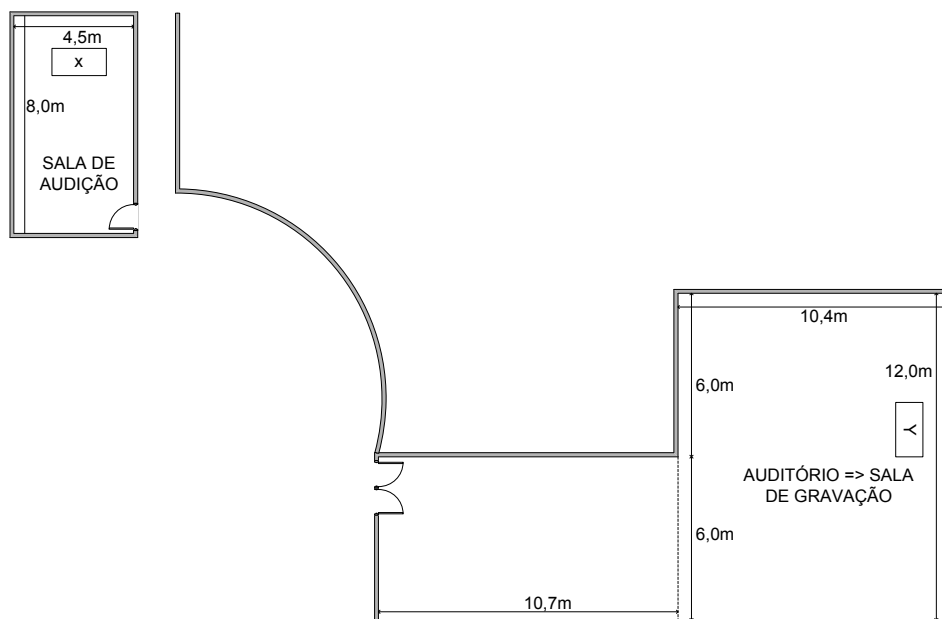
Figura 5.4: Saída da mesa de mistura utilizada para ligar os auscultadores

Refira-se que os auscultadores não foram ligados directamente à mesa de mistura. Ligou-se, à saída XLR assinalada, o cabo XLR (macho) – XLR (fêmea) com 50m. Este, por sua vez, ligou a um cabo XLR (fêmea) – *jack* 6,3mm que ligaria à entrada do amplificador dos auscultadores. Este amplificador garantiu que os auscultadores recebam um sinal balanceado, mais imune ao ruído. Os auscultadores foram ligados ao amplificador através do seu *jack* de 6,3mm.

Por fim, ligou-se a *webcam* ao PC1 via USB e ligou-se o PC2 ao PC1 através do cabo *Ethernet*.

#### 5.2.4 Espaço Escolhido para Testes

O espaço escolhido para a realização da experiência foi o Centro Universitário Fé e Cultura (CUFC) da Universidade de Aveiro, tendo sido utilizado o seu auditório como sala de gravação e uma pequena sala, suficientemente afastada deste para garantir o isolamento acústico, como sala de audição. Na Figura 5.5 apresenta-se a planta deste espaço.

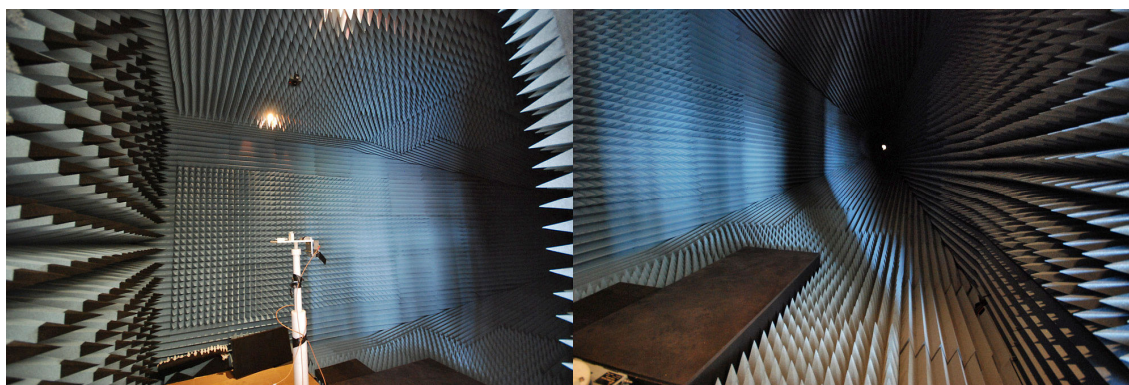


**Figura 5.5: Planta de parte do R/C do edifício CUFC**

Os pontos onde se realizaram a audição e a gravação encontram-se representados pelas letras *X* e *Y*, respectivamente.

### 5.2.5 Gravações Anecóicas

Para a escolha dos pontos óptimos utilizaram-se, como sinais de teste, sons gravados na câmara anecóica que aparece retratada na Figura 5.6.



**Figura 5.6: Fotografias do interior da câmara anecóica do DETIUA**

Esta situa-se na sala 345 do DETIUA e, como se pode observar, consiste num compartimento blindado cujas paredes, chão e tecto se encontram revestidos por um material absorvente de forma a diminuir e dispersar as reflexões indesejáveis das ondas



electromagnéticas. Apesar de se tratar duma câmara anecóica electromagnética, o seu comportamento com ondas sonoras também é bastante aceitável. Assim, este espaço praticamente não apresenta reverberação. Quando o som gravado na câmara anecóica é reproduzido por uma coluna, obtém-se um efeito muito parecido com o que é produzido quando a fonte é o próprio instrumentista.

As gravações anecóicas foram realizadas colocando um microfone (responsável pela captação de som) dentro da câmara ficando, no exterior, um PC (responsável pelo controlo da gravação) ao qual se ligou uma placa de som externa. Neste caso utilizou-se a placa Edirol FA-66 que se ligou ao PC via *FireWire*. A uma das entradas desta placa ligou-se uma mesa de mistura que tinha ligado a si o microfone. Foram realizadas gravações de flauta e guitarra que se encontram no *Anexo E*.

Ficou ainda aberta a possibilidade de virem a realizar-se mais gravações, com outros instrumentos, afim de se criar uma base de dados de sons anecóicos que se prevê muito útil para esta e outras experiências na área do áudio.

### 5.2.6 Relato da Experiência

A experiência realizou-se no dia 25 de Abril de 2008 tendo-se convidado a participar na mesma três reputados profissionais da área do áudio: José Fortes, Luís Belo Lopes e Vítor Génio.

De seguida mostram-se alguns registos fotográficos da sessão de trabalho.



**Figura 5.7:** Parte da montagem presente no auditório do CUFC (sala de gravações)



**Figura 5.8: Prof. José Vieira (docente do DETIUA responsável por este projecto) com Vítor Génio a testar o controlo do *Robot* de Captação de Som na sala de audição**





**Figura 5.9: Webcam de monitorização da plataforma a ser ajustada por Vítor Génio.**



**Figura 5.10: José Fortes posicionando o microfone na sala de audição, encontrando-se também presentes o Prof. José Vieira e Luís Belo Lopes.**



Na Figura 5.7 são visíveis no auditório: a Plataforma XY com o microfone acoplado, os *drivers* de controlo dos motores, o computador equipado com *LabVIEW* (PC 1 do esquema da Figura 5.2) e a coluna de som. Na Figura 5.8 é bem visível a imagem da *webcam* a ser recebida pelo PC presente na sala de audição (PC2 da Figura 5.2).

Após ter sido montado todo o *setup* verificou-se que o mesmo estava plenamente operacional, tendo-se então procedido à escolha dos pontos óptimos. Após as duas primeiras escolhas (uma por parte de José Fortes e outra por parte de Luís Belo Lopes) optou-se por gravar a RIR no ponto apontado como óptimo por Luís Belo Lopes. Por deficiente ajuste do volume do sinal utilizado para gravar a RIR (*chirp* logarítmico compreendido entre os 20Hz e os 20KHz, amostrado a 44100Hz, com 15 segundos de duração), a reprodução deste sinal danificou a coluna. Este problema levou ao término prematuro da experiência e impediu que se tivesse qualquer termo de comparação com os pontos óptimos escolhidos, pois já não foi possível realizar a medição da matriz de respostas impulsivas.

Apesar destes contratempos esta experiência foi muito rica e didáctica, tendo-se contado com a presença de profissionais de qualidade reconhecida na área do áudio que mostraram grande receptividade e interesse. Decidiu-se por isso, desde logo, agendar nova experiência.

### **5.3 Nova Experiência**

Preparou-se a nova experiência fazendo algumas alterações ao *setup* com vista a obter melhorias nalguns pontos. Um dos aspectos que se considerou interessante ver melhorado foi a comunicação entre as salas de audição e gravação. Assim, adicionou-se um novo PC com o intuito de estabelecer comunicação audiovisual entre as duas salas. Outra alteração diz respeito à placa de som que foi trocada por uma mais adequada a esta experiência, o que possibilitou que a mesa de mistura fosse dispensada.

De futuro, para que não se repitam problemas ocorridos na primeira experiência, será necessário que os sinais de teste utilizados para posicionar o microfone e para medir a RIR tenham amplitudes semelhantes.

Será também importante criar um documento que inclua um manual de procedimentos e uma ficha de registos onde poderá ser anotado o nome do utilizador, as coordenadas do ponto escolhido, as condições em que se realizou a experiência, etc.

### 5.3.1 Novo Esquema de Montagem

Com as alterações, o *setup* tomará a forma apresentada na Figura 5.11.

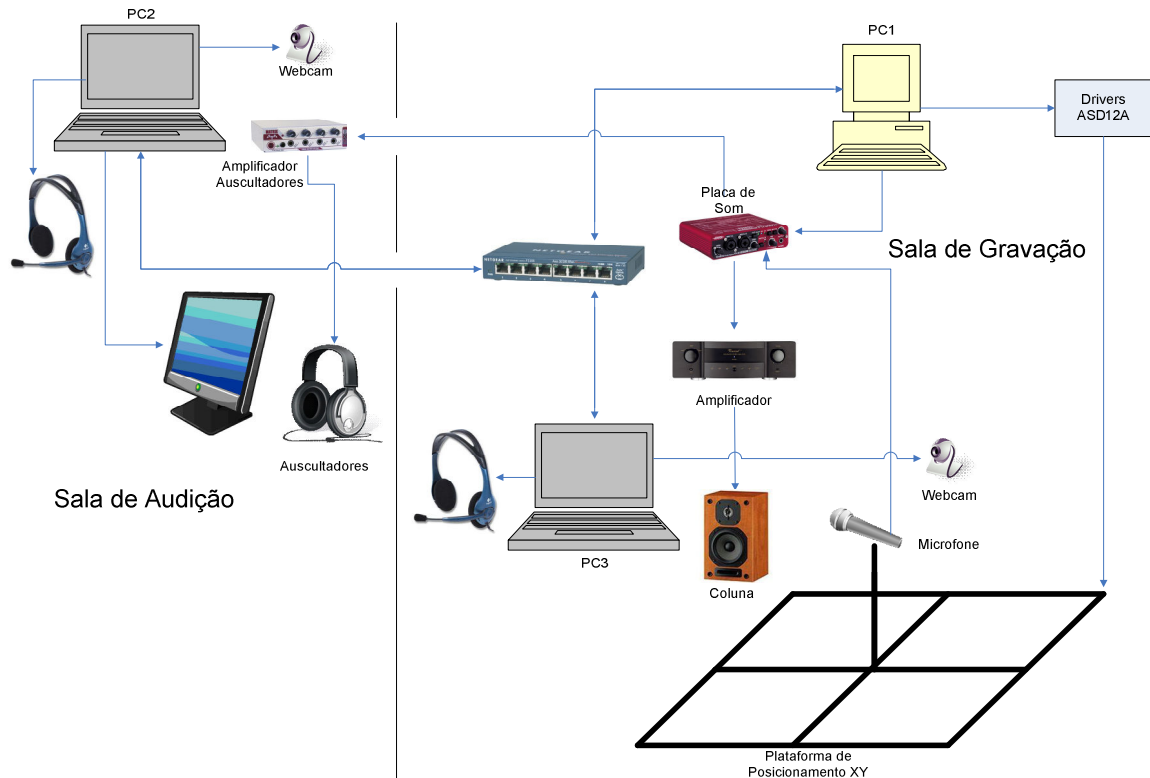


Figura 5.11: Esquema de montagem da experiência

Como se pode observar haverá agora um novo PC (PC3) na sala de gravações que será responsável apenas pela comunicação com a sala de audição. Para que esta comunicação seja possível é necessário que o PC2 acumule as funções de comunicação com as de controlo do *Robot* de Captação de Som. Para tal, adicionou-se outro monitor ao PC2 para que o utilizador tenha num monitor o controlo do *Robot* e no outro as ferramentas de comunicação. A forma de comunicação escolhida foi o *software Microsoft NetMeeting* que permite a transmissão de vídeo e som entre dois computadores ligados em rede. Foram, então, criadas ligações *Ethernet* entre os três computadores, utilizando um *switch* e foram adicionados aos PCs 2 e 3 microfones e auscultadores.

O restante *setup* manteve-se, à excepção da mesa de mistura que foi retirada por já não ser necessária. A placa de som utilizada na primeira experiência (Edirol UA-5) não disponibiliza nas suas saídas o som captado pelo microfone separado do som que está a ser enviado pelo PC para a coluna. Assim sendo, recorreu-se à mesa de mistura para separar estes dois sinais. Com a nova placa de som (Edirol FA-66) já é possível a separação entre os referidos sinais, pelo que, deixa de ser necessária a mesa de mistura.

Este *setup* já foi montado e testado verificando-se o seu perfeito funcionamento. Assim, planeia-se promover nova visita de José Fortes, que deixou também em aberto a possibilidade de usar a sua *régie* móvel como sala de audição. Se tal acontecer será necessária uma adaptação do *setup* acima descrito. Essa possibilidade trará a vantagem de se ter maior controlo sobre o sistema áudio (os ajustes de volume passarão a estar perto do utilizador) e melhores condições de audição devido ao melhor isolamento acústico e à qualidade do material áudio à disposição.

### 5.3.2 Detalhes da Nova Montagem

Relativamente ao procedimento de montagem descrito na secção 5.2.3, resta acrescentar a forma como se ligará a nova placa de som (Edirol FA-66). A Figura 5.12 esquematiza o modo como devem ser feitas as ligações.

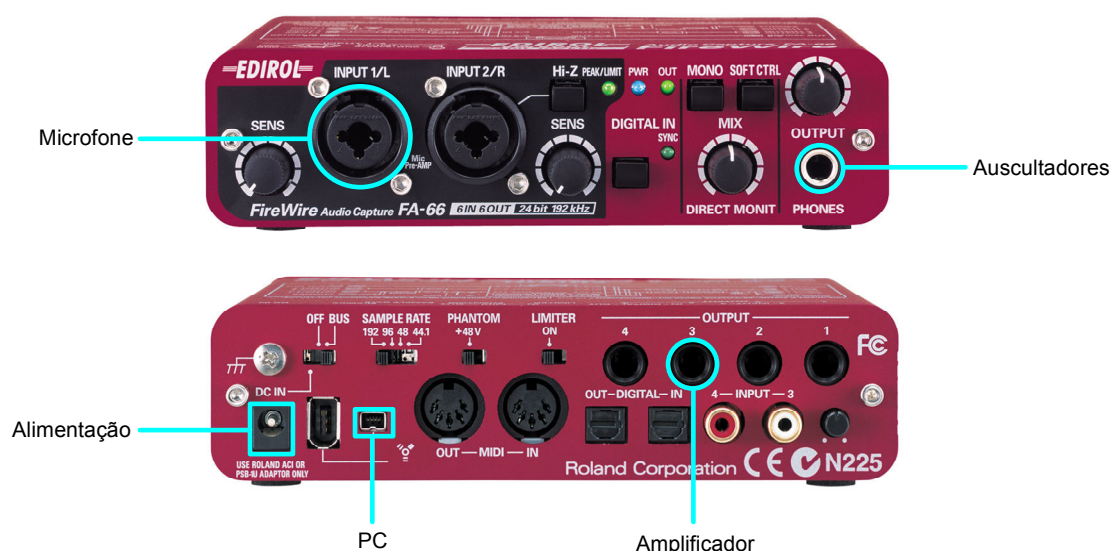


Figura 5.12: Esquema das ligações realizadas à placa Edirol FA-66

Note-se que esta placa não possui ligação USB sendo a sua comunicação com o PC garantida por uma ligação *FireWire*.

A razão pela qual se liga o amplificador à saída 3 (também poderia ser à 4), e não à 1 ou à 2, é o facto de esta saída disponibilizar o sinal que será enviado pelo PC para a coluna separado do sinal que é captado pelo microfone (ver Figura 5.13).

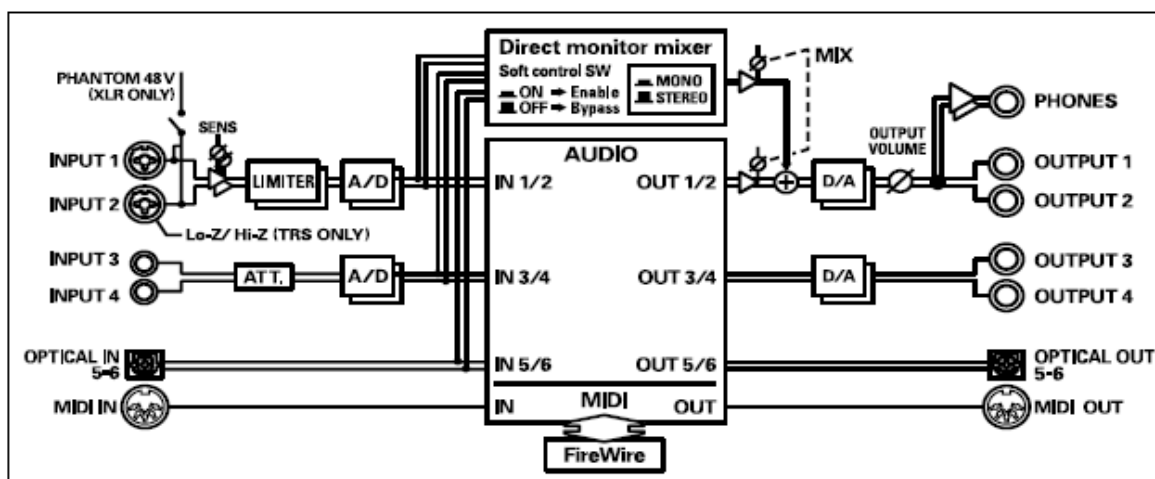


Figura 5.13: Esquema da placa de som Edirol FA-66 [20]

Como se pode observar, ao contrário das saídas 3 e 4, as saídas 1 e 2 da placa Edirol FA-66 disponibilizam o sinal proveniente da entrada 1 (microfone, no nosso caso) somado com o sinal proveniente do PC (*FireWire*).

### 5.3.3 Alterações de *Software*

Optou-se também pela realização de algumas alterações ao *software* de controlo do *Robot* de Captação de Som. Tendo agora dois PCs a funcionar como intercomunicadores, pôde eliminar-se o modo de transmissão de imagem do *LabVIEW* tornando, assim, o *software* mais leve no que respeita ao processamento. Outra das alterações idealizadas, e que se encontra em curso, é relativa ao método de controlo. Abandonar-se-á o controlo pelo método de velocidade em detrimento do controlo pelo método de posição.

A razão para esta última alteração é tentar resolver o problema de não se ter conseguido um cálculo preciso da posição dos motores (secção 4.3.2.4). A grande vantagem desta alteração, como é fácil de inferir, é o facto de se ter sempre uma indicação precisa da posição em que o microfone se encontra. A sua desvantagem é o facto de não se conseguir

ter um movimento suave dos eixos da plataforma, como acontece no controlo em modo de velocidade.

Prevê-se ainda a inclusão à interface de um mapa da plataforma. Nele o utilizador poderá ver, em tempo real, qual a posição do microfone relativamente à coluna.



## 6 Conclusões e Trabalho Futuro

Este projecto tinha como primeiro objectivo a criação de um sistema que permitisse posicionar remotamente um microfone e controlar dispositivos áudio para poder reproduzir e captar a resposta impulsional de uma sala (RIR – *Room Impulse Response*). Este objectivo foi cumprido na íntegra através da criação de um sistema ao qual se chamou *Robot* de Captação de Som. Este *Robot*, gozando da capacidade de executar simultaneamente as duas tarefas enunciadas, permitiu que lhe fossem impostos dois modos de funcionamento distintos. O Modo Matriz, que permite fazer uma aquisição, em vários pontos, da resposta impulsional duma sala e o Modo *Joystick*, que permite que o utilizador posicione o microfone enquanto ouve, através de auscultadores, o som que este capta.

Estas funcionalidades do *Robot* de Captação de Som servem o estudo de critérios utilizados no posicionamento de microfones. Era parte integrante dos objectivos deste trabalho conseguir traduzir esses critérios algoritmicamente e, para tal, executou-se uma experiência com técnicos de som. Tratando-se dum dos pontos essenciais deste estudo, esta experiência (que consistia na escolha de pontos óptimos de captação de som), não permitiu tirar todas as conclusões desejadas.

Assim sendo, como trabalho futuro, poder-se-á começar por repetir a experiência, com algumas alterações. A nova experiência encontra-se já planificada e quase toda ela testada, como é referido na secção 5.3. Encontram-se ainda em curso as alterações de *software*. Poderá haver ainda uma ligeira adaptação à montagem caso José Fortes deseje utilizar a sua *régie* móvel como sala de audição, como o próprio sugeriu.

Tendo os resultados da nova experiência poder-se-á entrar no estudo dos critérios de posicionamento. Este poderá ser realizado utilizando e aperfeiçoando os algoritmos de processamento de sinal já desenvolvidos que se encontram no *Anexo A* e são referidos na secção 5.1. Outro estudo que será de tremenda importância é a visualização 3D dos dados adquiridos. Essa visualização poderá ser feita através do *software* VTK, realizando uma adaptação de [19]. Pretende-se visualizar em 3D não só o modo como varia a RIR ao longo do tempo mas também a resposta em frequência das gravações realizadas (secção 5.1). Espera-se que estas visualizações permitam recolher dados que possam relacionar a escolha de um ponto óptimo de captação com o comportamento modal da sala.

Em termos de *hardware* os progressos poderão passar pela utilização de microfones *wireless* para evitar problemas com cabos (corre-se sempre o risco destes se enrolarem na Plataforma XY).

Estas tarefas poderão ser, hipoteticamente, cumpridas a curto e médio prazo, remetendo-se para mais tarde os objectivos que serão descritos de seguida.

No caso do estudo dos critérios de posicionamento de microfones ter sido conclusivo, poder-se-á implementar um algoritmo de cálculo do ponto óptimo de captação de som que permitirá ao *Robot* posicionar o microfone nesse ponto de forma autónoma.

Poder-se-á também renovar algum do *hardware* de controlo da Plataforma XY, nomeadamente adquirir novos controladores para os motores de forma a evitar problemas como o que é descrito na secção 4.3.2.4 e que advém do facto de o controlador PCI 7314 da *National Instruments* (NI) ser *hardware* obsoleto que contribui para um controlo menos robusto dos motores. Os controladores das séries NI – 7330, NI – 7340 e NI – 7350, por exemplo, serão boas escolhas para substituir o antigo, como é explicado em [18].

Outro dos objectivos em aberto é tornar o sistema de posicionamento remoto do microfone mais completo e robusto. Esta tarefa passará por acrescentar mais graus de liberdade ao sistema, dotando-o da capacidade de se movimentar também em altura (posicionamento segundo Z), em azimute e em elevação. Note-se que uma das teorias que é defendida por José Fortes é que o posicionamento segundo os eixos X e Y está relacionado com o tempo, isto é, com a relação entre o som directo e o reflectido, estando o movimento segundo Z relacionado com a dinâmica (intensidade sonora) pelo que, conferir ao sistema mais graus de liberdade é essencial para este estudo. Assim, perspectiva-se o abandono da Plataforma XY e a construção de um *Robot* propositadamente para este projecto, que deverá contemplar já todos os graus de liberdade referidos anteriormente. O novo sistema permitirá colocar o microfone a apontar para qualquer ponto do espaço.

Durante a realização deste estudo foi necessário fazer testes utilizando sons anecóicos. Assim, optou-se pela gravação desses sons uma vez que se dispunha do espaço adequado – câmara anecóica (secção 5.2.5). De imediato surgiu a ideia de criar uma base de dados de gravações anecóicas para poder ser utilizada neste e noutros projectos. Esta tarefa, não tendo que ser necessariamente realizada no âmbito deste projecto, não deve ser descurada tendo em conta a facilidade de acesso a uma câmara anecóica no DETIUA e sabendo-se da



grande utilidade que uma base de dados deste tipo poderá ter. Poderiam realizar-se gravações com vários instrumentos e com vozes de diferentes cantores, colocando-se depois todo o material *online*. Actualmente não existe na *Internet* nenhuma base de dados semelhante.

No âmbito deste trabalho surgiu ainda a ideia de construir *software* para que vários utilizadores pudessem analisar os dados adquiridos e classificá-los segundo a sua opinião pessoal. Assim, foi proposto na disciplina de Interfaces Humano-Computador, leccionada no DETIUA, a construção de duas interfaces para estudar a preferência subjectiva de vários utilizadores no que respeita à captação de som. A proposta referida encontra-se no *Anexo F* e consiste em dois modos de comparação: *ranking* por comparação A-B e posicionamento virtual de microfones.

No primeiro caso, pretende-se que o utilizador ouça um conjunto de  $n$  gravações do mesmo som, captadas com diferentes posicionamentos do microfone, e as ordene de acordo com a sua preferência. A comparação entre as várias gravações é feita por pares podendo o utilizador escolher se gostou mais da gravação A, da B ou se não tem preferência entre as duas. Após terem sido realizadas comparações entre todos os pares possíveis de gravações o programa apresentará a lista das  $n$  gravações ordenadas segundo a preferência do utilizador. Por fim submeter-se-ão as listas ordenadas de vários utilizadores a uma análise estatística.

O modo de posicionamento virtual de microfones consistirá na escolha de um ponto preferido para a captação de som, num procedimento semelhante ao que é descrito na secção 5.2.1. No entanto, em vez de se utilizar o *Robot* de Captação de Som utilizar-se-á uma interface que o simulará. Para tal será necessário ter disponíveis as gravações efectuadas pelo *Robot* de Captação numa matriz de pontos, podendo o utilizador navegar no interior dum quadrilátero representativo da área em que se distribuem esses pontos.

Outra tarefa a realizar no futuro poderá então passar pela continuação da construção das interfaces mencionadas.

Para finalizar, resta dizer que este projecto é um estudo interessante e inovador que merece ser continuado com o intuito de obter resultados que serão, de certo, muito importantes para a área do áudio e que poderão trazer muitos progressos no que concerne à captação de som.



## Anexo A

No CD contíguo a esta dissertação encontram-se guardados, na pasta **M-Files**, todos os *scripts* criados em *MATLAB* que se utilizaram. Os ficheiros presentes nessa pasta são listados de seguida:

Nome do Ficheiro	Função
<i>Teste_correlacao.m</i>	Programa de teste do método da correlação para obtenção da Resposta Impulsional de um sistema.
<i>gerador_mls.m</i>	Função que gera um sinal MLS
<i>linchirp.m</i>	Função que gera um <i>chirp</i> linear
<i>logchirp.m</i>	Função que gera um <i>chirp</i> logarítmico
<i>process_sinal.m</i>	Algoritmo de processamento de sinal a ser aplicado às medições acústicas efectuadas

## Anexo B

No CD contíguo a esta dissertação encontra-se guardado, na pasta **Palestra**, o material utilizado para realizar a apresentação tutorial sobre *LabVIEW*.

## Anexo C

No CD contíguo a esta dissertação encontra-se guardado, na pasta **programa\_controlo**, todo o *software* programado em *LabVIEW* para controlar o *Robot* de Captação de Som.

## **Anexo D**

No CD contíguo a esta dissertação encontram-se, na pasta **medições**, dados adquiridos através da gravação de respostas impulsionais. A pasta **10x10** contém medições realizadas para uma matriz de 100 pontos e a pasta **5x5** para matrizes de 25 pontos.

## **Anexo E**

No CD contíguo a esta dissertação encontram-se, na pasta **gravações\_anecóicas**, as gravações realizadas em flauta e guitarra na câmara anecóica.

## Anexo F

### Propostas para estudos de preferência subjectiva em captação de áudio

#### I – *Ranking* por comparação A-B

Dado um conjunto de  $n$  gravações simultâneas do mesmo som, com igual duração, que diferem apenas nas condições de captação (posicionamento do microfone), pretende-se determinar as melhores condições de captação, submetendo estas gravações a um painel de avaliação.

Para apoiar este estudo, é necessária uma aplicação que permita a cada sujeito do painel de avaliação comparar as  $n$  gravações (ficheiros .wav) e estabelecer uma ordenação (*ranking*) segundo a sua preferência subjectiva. O conjunto dos resultados será depois analisado estatisticamente.

O programa deve começar por registar uma ficha de identificação do utilizador (incluindo, por exemplo, nome, idade, habilitações musicais).

As comparações devem ser feitas por pares (*paired comparison*): confrontado com um par de sons (A e B), representados visualmente por dois ícones, o utilizador deve poder comutar livremente entre eles seleccionando os respectivos ícones (ex: click em A – inicia reprodução do ficheiro A; click em B – comuta para ficheiro B, prosseguindo no mesmo ponto; click em B – reinicia reprodução do ficheiro B). Devem ser-lhe oferecidas três possibilidades de resposta: A (prefiro A), B (prefiro B) e X (não tenho preferência).

O programa deve determinar e propor as comparações necessárias para estabelecer a ordenação das  $n$  gravações, após o que poderá propor comparações adicionais para testar a coerência das respostas.

#### II – Posicionamento virtual de microfones

Dadas gravações simultâneas do mesmo som, com igual duração, obtidas em pontos uniformemente distribuídos numa grelha X-Y, pretende-se escolher o ponto de captação ideal, com o auxílio de um painel de avaliação.

Para apoiar este estudo, é necessária uma aplicação que permita a cada sujeito do painel de avaliação navegar (utilizando o cursor) no interior de um quadrilátero representando a área em que se distribuíram os pontos de captação.

O som reproduzido deve corresponder à posição do cursor, sendo obtido por interpolação dos ficheiros .wav correspondentes aos pontos da grelha mais próximos. Assim, o utilizador pode posicionar virtualmente o microfone, escolhendo o seu ponto de captação preferido. O programa deve registar as coordenadas desse ponto, bem como uma ficha de identificação do utilizador (incluindo, por exemplo, nome, idade, habilitações musicais).



## Referências

- [1] L. B. Jackson, “*Signals, Systems and Transforms*”, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [2] Steven W. Smith, “*The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*”, 2<sup>nd</sup> edition, California Technical Publishing, 1999.
- [3] Tomás Oliveira e Silva, “*Apontamentos de Processamento Digital de Sinal*”, Universidade de Aveiro, 2003.
- [4] Leo L. Beranek, “*Acoustical Measurements*”, revised edition, American Institute of Physics, 1988.
- [5] Swen Müller and Paulo Massarani, “Transfer-Function Measurement with Sweeps”, *J.AES*, vol. 49, pp. 443-471, 2001.
- [6] E. C. Ifeachor and B. W. Jervis, “*Digital Signal Processing – A Practical Approach*”, Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [7] Ole-Herman Bjor, “New Measurement Methods in Building Acoustics”, Ecophon Acoustic Bulletin.  
[URL: http://www.acousticbulletin.com/EN/2005/12/iso\\_18233\\_use\\_of\\_new\\_measures.html](http://www.acousticbulletin.com/EN/2005/12/iso_18233_use_of_new_measures.html), Maio 2008.
- [8] James H. McClellan, Ronald W. Schafer, Mark A. Yoder, “*Signal Processing First*”, Pearson Prentice Hall, 2003.
- [9] Angelo Farina, “Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique”, *J.AES*, vol. 48, p. 350, 108<sup>th</sup> AES Convention, Paris, 2000.
- [10] S. Mota, “*Caracterização do Canal de Propagação Direccional em Banda Larga para Sistemas Rádio Móvel*”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, 2003.
- [11] VEXTA – alpha step, Closed Loop Stepping Motor and Driver Package, 2006.
- [12] Motion Control 7324/7314 Hardware User Manual, National Instruments, August 2000.
- [13] Using Microphones. URL: <http://www.mediacollege.com/audio/microphones/>, Junho 2008.
- [14] F. Alton Everest, “*The Master Handbook of Acoustics*”, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw Hill, 1994.

- [15] SoundField MKV Studio Microphone System.  
URL: <http://www.soundfield.com/products/mkv.php>, Abril 2008.
- [16] The story of a multi-miked location recording session, from pre-concert setup to post-recording, software-controlled mixdown, The SoundField Microphone.  
URL: <http://www.soundonsound.com/sos/jun04/articles/liveconcert.htm>, Abril 2008.
- [17] Jeffrey Travis and Jim Kring, “*LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*”, 3<sup>rd</sup> edition, Prentice Hall, 2006.
- [18] National Instruments Discussion Forums.  
URL: <http://forums.ni.com/ni/board/message?board.id=240&message.id=6152&query.id=80540#M6152>, Março 2008.
- [19] Ricardo Casaleiro, Bruno Quintela, Frederico Valente, Vítor Rodrigues, Guilherme Campos e Paulo Dias, “Visualização da Propagação de Ondas Sonoras no Espaço Utilizando VTK – *Visualization ToolKit*”, Revista do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, nº 9, vol. 4, pp. 1054-1058, Junho 2008.
- [20] Edirol FireWire AudioCapture FA-66 Owner’s Manual, Roland Corporation, 2005.